



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Ξήρανση καρυδιού σε ξηραντήριο αερολέβητα και χρήση του κελύφους του καρυδιού ως βιομάζα



Φοιτητής : ΤΣΑΝΤΙΚΙΔΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ, ΑΕΜ: 1452

Επιβλέπων καθηγητής : ΠΑΝΑΡΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΚΟΖΑΝΗ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2024

Ευχαριστίες-Αφιερώσεις

Καθώς φτάνουμε στο τέλος αυτού του σημαντικού και διαφωτιστικού ταξιδιού που αποτελεί η συγγραφή της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να αφιερώσω λίγα λόγια για να εκφράσω τις βαθύτατες ευχαριστίες μου προς όλους όσους με στήριξαν και με βοήθησαν στην επίτευξη αυτού του στόχου.

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να εκφράσω την άπειρη εκτίμηση και τις ευχαριστίες μου προς τον εξαιρετικό μου επιβλέποντα, τον καθηγητή μου κ. Γεώργιο Πανάρα. Η διορατικότητά του, η αφοσίωση και η επιμονή του να αναδείξει το καλύτερο δυνατό από τις ερευνητικές μου προσπάθειες, ήταν καθοριστικής σημασίας για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας. Η ευκαιρία που μου παρείχε να ερευνήσω ένα θέμα τόσο πρωτότυπο και ενδιαφέρον, μαζί με την πολύτιμη καθοδήγηση και την άμεση διαθεσιμότητά του, αποτέλεσαν πηγή έμπνευσης και με βοήθησαν να ξεπεράσω κάθε εμπόδιο στην ερευνητική μου διαδρομή.

Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω την βαθιά μου ευγνωμοσύνη προς την οικογένειά μου, η οποία στάθηκε ακλόνητα δίπλα μου κατά τη διάρκεια αυτής της πορείας. Η ανιδιοτελής αγάπη, η στήριξη και η υπομονή που μου προσέφεραν ήταν οι πυλώνες πάνω στους οποίους στηρίχθηκα για να φέρω εις πέρας αυτή την εργασία. Η πίστη τους στις δυνατότητές μου και η αδιάκοπη ενθάρρυνσή τους αποτελούν τον πολυτιμότερο θησαυρό που κουβαλώ στην καρδιά μου.

Δεν μπορώ να προχωρήσω χωρίς να εκφράσω την βαθιά ευγνωμοσύνη μου προς ένα πολύ ιδιαίτερο πρόσωπο στην ζωή μου, την Κωνσταντίνα Καρακούλα. Η Κωνσταντίνα ήταν η πηγή της ψυχικής μου δύναμης και της ενέργειας που χρειαζόμουν για να φτάσω στο τέλος αυτής της επιστημονικής περιπέτειας. Με την απaráμιλλη υποστήριξη, την ακλόνητη πίστη στις δυνατότητές μου και τα απαραίτητα κίνητρα που μου προσέφερε, με βοήθησε να ξεπεράσω τις δυσκολίες και να διατηρήσω την εστίασή μου στον τελικό στόχο. Η παρουσία της στη ζωή μου ήταν καθοριστική, όχι μόνο για την επιτυχία αυτού του έργου αλλά και για την προσωπική μου ευημερία και ανάπτυξη.

Από τα βάθη της καρδιάς μου, σας ευχαριστώ.

Κοζάνη, Μάρτιος 2024

Τσαντικίδης Γεώργιος

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει εκτενώς την ξήρανση αγροτικών προϊόντων, με ειδική έμφαση στην καλλιέργεια και επεξεργασία των καρυδιών στην Ελλάδα, καθώς και την αξιοποίηση των γεωργικών αποβλήτων μέσα στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας. Αφιερώνοντας ένα σημαντικό μέρος στην βιομάζα και τις πρώτες ύλες που σχετίζονται με αυτήν, η εργασία αναλύει τους μετασχηματισμούς της βιομάζας σε ενέργεια και επικεντρώνεται στα συστήματα θέρμανσης που χρησιμοποιούν τη βιομάζα.

Προχωρώντας στον σχεδιασμό και τη λειτουργία ξηραντήριων, η εργασία αναφέρεται στους διάφορους τύπους ξηραντήριων που υπάρχουν, όπως ξηραντήρια ρευστοποιημένης κλίνης, θαλάμων με δίσκους, ηλιακά, περιστροφικής κίνησης, λυοφιλίωσης, μικροκυμάτων, τυμπάνου, και σήραγγες ξήρανσης τύπου τούνελ, εξετάζοντας τα χαρακτηριστικά και τις εφαρμογές τους.

Ειδικότερα, η μοντελοποίηση της διαδικασίας ξήρανσης παρουσιάζεται με λεπτομέρεια, αποκαλύπτοντας τις θεωρητικές προσεγγίσεις και τις φάσεις της ξήρανσης, καθώς και την εφαρμογή μαθηματικών μοντέλων για την ανάλυση της κινητικής της ξήρανσης.

Το κύριο επίκεντρο της εργασίας είναι η ανάλυση των χαρακτηριστικών του κελύφους καρυδιού ως πηγής βιομάζας και η εφαρμογή του σε ένα προηγμένο σύστημα ξήρανσης καρυδιών με τη χρήση αερολέβητα βιομάζας. Αναλύεται η θερμογόνο δύναμη του κελύφους και πώς αυτό μπορεί να αξιοποιηθεί ως βιοκαύσιμο, παρέχοντας μια βιώσιμη και οικονομικά αποδοτική λύση για την ξήρανση καρυδιών.

Στο τελευταίο κεφάλαιο, η εργασία προσφέρει μια σύνθετη μοντελοποίηση και ανάλυση της λειτουργίας ενός ξηραντήριου καρυδιού με τη χρήση βιομάζας, συγκρίνοντας την με την λειτουργία ενός συμβατικού ξηραντήριου. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης και διερευνώνται οι λειτουργικές συνθήκες, με ιδιαίτερη έμφαση στην οικονομική και περιβαλλοντική αποδοτικότητα της χρήσης κελύφους καρυδιού ως βιοκαυσίμου.

Συνοψίζοντας, η διπλωματική εργασία καταλήγει στην επιβεβαίωση του πλεονεκτήματος της χρήσης βιομάζας, ειδικά του κελύφους καρυδιού, για την ξήρανση καρυδιών σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους, υπογραμμίζοντας τη σημασία της καινοτομίας στις γεωργικές διαδικασίες και την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα της αειφόρου ενεργειακής χρήσης.

Abstract

This thesis extensively examines the drying of agricultural products, focusing specifically on walnut cultivation and processing in Greece, and the utilization of agricultural waste within the framework of the circular economy. A significant portion is dedicated to biomass and its related raw materials, analyzing biomass transformations into energy and focusing on biomass heating systems.

Delving into the design and operation of dryers, the work discusses various types of dryers available, such as fluidized bed dryers, chamber disk dryers, solar dryers, rotary motion dryers, lyophilization, microwave dryers, drum dryers, and tunnel or tunnel-type drying, examining their characteristics and applications.

Particularly, the modeling of the drying process is detailed, revealing theoretical approaches and phases of drying, as well as the application of mathematical models for analyzing the kinetics of drying.

The core focus of the thesis is on analyzing walnut shell characteristics as a biomass source and its application in an advanced walnut drying system using biomass air heaters. The calorific value of the walnut shell is analyzed, and how it can be utilized as biofuel, providing a sustainable and cost-effective solution for walnut drying.

In the final chapter, the thesis offers a comprehensive modeling and analysis of the operation of a walnut dryer using biomass, comparing it to the operation of a conventional dryer. The results of the analysis are presented, exploring the operational conditions, with a particular emphasis on the economic and environmental efficiency of using walnut shells as biofuel.

In summary, this dissertation confirms the advantage of using biomass, specifically walnut shells, for drying walnuts compared to traditional methods, highlighting the importance of innovation in agricultural processes and the need for further research and development in the field of sustainable energy use.

Πίνακας Περιεχομένων

Σύμβολα	8
Εισαγωγή	9
Κεφάλαιο 1: Χρήσιμα στοιχεία και ορισμοί.....	10
1.1 Εισαγωγή.....	10
1.2 Ξήρανση αγροτικών προϊόντων	10
1.2.1 Μέθοδοι ξήρανσης.....	11
1.3 Καλλιέργειες καρυδιού στην Ελλάδα.....	14
1.4 Γεωργικά απόβλητα και κυκλική οικονομία	15
1.5 Βιομάζα	17
1.5.1 Ορισμός βιομάζας	17
1.5.2 Βασικές πρώτες ύλες βιομάζας.....	18
1.5.3 Μέθοδοι για τη μετατροπή βιομάζας σε ενέργεια.....	21
1.6 Συστήματα θέρμανσης βιομάζας.....	22
Κεφάλαιο 2 : Τύποι ξηραντήριων.....	26
2.1 Εισαγωγή	26
2.2 Ξηραντήρια ρευστοποιημένης κλίνης.....	26
2.3 Ξηραντήρια θαλάμων με δίσκους.....	27
2.4 Ηλιακά ξηραντήρια.....	28
2.5 Ξηραντήριο περιστροφικής κίνησης	30
2.6 Λυοφιλίωση.....	30
2.7 Ξηραντήρια μικροκυμάτων	31
2.8 Ξηραντήρια Τυμπάνου	32
2.9 Σήραγγες Ξήρανσης ή ξήρανση τύπου τούνελ.....	33
Κεφάλαιο 3 : Μοντελοποίηση της διεργασίας της ξήρανσης.....	35
3.1 Εισαγωγή στη μοντελοποίηση της διεργασίας ξήρανσης	35
3.2 Θεωρητική Προσέγγιση της Διεργασίας Ξήρανσης	35
3.3 Ισόθερμες καμπύλες ρόφησης.....	35
3.3.1 Δραστικότητα της υγρασίας.....	35
3.3.2 Μαθηματικά μοντέλα για τις ισόθερμες καμπύλες ρόφησης.....	37
3.4 Φάσεις της ξήρανσης	42
3.5 Μοντέλα προσδιορισμού της κινητικής της ξήρανσης	44
3.5.1 Εισαγωγή	44

3.5.2 Μοντέλα μοριακής διάχυσης.....	45
3.5.2.1 Παραδοχές.....	45
3.5.2.2 Πλάκα απείρου μήκους.....	46
3.5.2.3 Προϊόν σφαιρικής γεωμετρίας.....	47
3.5.2.4 Συντελεστής διάχυσης <i>Def</i>	48
3.5.2.5 Ημιεμπειρικά μοντέλα διάχυσης.....	49
Κεφάλαιο 4 : Χαρακτηριστικά κελύφους καρυδιού ως βιομάζα.....	51
4.1 Εισαγωγή.....	51
4.2 Επεξεργασία καρυδιού.....	52
.....	60
4.3 Θερμογόνος δύναμη κελύφους καρυδιού.....	60
4.3.1 Εισαγωγή.....	60
4.3.2 Προσδιορισμός της ανώτερης θερμογόνου δύναμης του κελύφους του καρυδιού.....	61
Κεφάλαιο 5 : Σχεδιασμός και μοντελοποίηση λειτουργίας ξηραντήριου καρυδιού με χρήση βιομάζας.....	65
5.1 Εισαγωγή.....	65
5.2 Σχεδιασμός θαλάμου για ξήρανση καρυδιού.....	66
5.3 Μοντελοποίηση λειτουργίας συμβατικού ξηραντήριου καρυδιών.....	70
5.3.1 Συνθήκες λειτουργίας ξηραντήριου.....	70
5.3.2 Επιλογή μοντέλου ξήρανσης καρυδιού.....	71
5.3.3 Περιγραφή διάταξης.....	72
5.3.4 Μοντελοποίηση λειτουργίας συμβατικού ξηραντήριου.....	73
5.4 Αποτελέσματα ανάλυσης.....	78
5.5 Διερεύνηση λειτουργίας ξηραντήριου καρυδιού με αερολέβητα βιομάζας.....	84
5.5.1 Περιγραφή ξηραντήριου.....	84
5.5.2 Κέλυφος καρυδιού ως βιοκαύσιμο.....	85
5.6 Σύγκριση των διατάξεων ξηραντήριων.....	87
Κεφάλαιο 6 : Συμπεράσματα.....	90
Βιβλιογραφία.....	91
Ιστοσελίδες.....	93

Σύμβολα

X_e	υγρασία ισορροπίας (ξ.β.)	[g/kg]
X₀	αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία (ξ.β.)	[g/kg]
X_t	περιεκτικότητα σε υγρασία (ξ.β.) ανά χρονική στιγμή	[g/kg]
T	θερμοκρασία	[°C]
ΔT	θερμοκρασιακή διαφορά	[K]
Δτ	χρονικό βήμα	[sec]
SEC	ειδική κατανάλωση ενέργειας	[MJ/kg]
DR	ρυθμός ξήρανσης	[kg water/kg wet mass min]
P	ισχύς	[kW]
Q	θερμική ενέργεια	[J]
MR	αδιάστατος λόγος υγρασίας	[-]
h_g	ειδική ενθαλπία εξατμίσεως νερού	[J/kg]
D_{ef}	συντελεστής διάχυσης	[m²/s]
C_p	ειδική θερμοχωρητικότητα	[J/(kgk)]
a_w	δραστικότητα υγρασίας	[-]
A	επιφάνεια	[m²]
L	μήκος	[m]
r	ακτίνα	[m]
HHV_d	ανώτερη θερμογόνος δύναμη	[MJ/kg]
GHV	μετρούμενη θερμογόνος δύναμη	[MJ/kg]
η	βαθμός απόδοσης	[-]

Εισαγωγή

Η ξήρανση αποτελεί μία κρίσιμη διαδικασία στην παραγωγή και διατήρηση πολλών γεωργικών προϊόντων, καθώς επηρεάζει άμεσα την ποιότητα, τη διατροφική αξία, τη διάρκεια ζωής και την ασφάλεια του τελικού προϊόντος. Η ξήρανση αφορά την αφαίρεση υγρασίας από τα προϊόντα, μειώνοντας έτσι την πιθανότητα ανάπτυξης μικροοργανισμών και την εμφάνιση διαβρωτικών διεργασιών.

Στην περίπτωση των καρυδιών, η ξήρανση είναι ιδιαίτερα σημαντική διότι συμβάλλει στην προστασία τους από τη μούχλα και άλλες μορφές αλλοίωσης. Τα καρύδια περιέχουν υψηλά επίπεδα λιπαρών ουσιών, τα οποία είναι επιρρεπή σε οξείδωση και υποβάθμιση όταν εκτίθενται σε υγρασία για παρατεταμένες περιόδους. Η επιτυχημένη ξήρανση εξασφαλίζει τη διατήρηση της γεύσης, της υφής και της διατροφικής αξίας των καρυδιών, καθώς και την παράταση της διάρκειας ζωής τους.

Η διαδικασία ξήρανσης των καρυδιών απαιτεί προσοχή στην επιλογή της σωστής θερμοκρασίας και της διάρκειας ξήρανσης. Υπερβολικά υψηλές θερμοκρασίες ή παρατεταμένη ξήρανση μπορούν να προκαλέσουν ζημιά στα λιπαρά οξέα του καρυδιού, επηρεάζοντας αρνητικά τη γεύση και τη διατροφική του αξία. Αντίστοιχα, ανεπαρκής ξήρανση μπορεί να μην αφαιρέσει επαρκώς την υγρασία, αφήνοντας τα καρύδια ευάλωτα σε μούχλα και αλλοίωση.

Συνοψίζοντας, η σωστή ξήρανση των καρυδιών αποτελεί έναν ουσιαστικό παράγοντα για τη διασφάλιση της ποιότητας και της ασφάλειας αυτού του πολύτιμου γεωργικού προϊόντος, και απαιτεί επιμελημένη εφαρμογή και εποπτεία.

Η παρούσα διπλωματική εργασία θα επικεντρωθεί στην ξήρανση των καρυδιών, δίνοντας έμφαση στην χρήση αερόθερμου λέβητα βιομάζας για την διαδικασία της ξήρανσης. Συνεπώς, στόχος της εργασίας είναι η παρουσίαση ενός εναλλακτικού σχεδίου ξήρανσης το οποίο έγκειται στα πλαίσια της κυκλικής οικονομίας, καθώς ως καύσιμο του βιολέβητα θα είναι το κέλυφος του καρυδιού, προσφέροντας μια οικονομικότερη και εξίσου αποδοτική λύση για μικρομεσαίους καλλιεργητές.

Κεφάλαιο 1: Χρήσιμα στοιχεία και ορισμοί

1.1 Εισαγωγή

Στο πλαίσιο της παρούσας ενότητας, διατυπώνονται και αναλύονται κρίσιμες εισαγωγικές έννοιες και ορισμοί, οι οποίοι είναι θεμελιώδεις για την εμπειριστατωμένη και ολοκληρωμένη κατανόηση των μεθοδολογιών και των ευρημάτων που παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

1.2 Ξήρανση αγροτικών προϊόντων

Η ξήρανση των αγροτικών προϊόντων αποτελεί μία από τις παλαιότερες και πιο θεμελιώδεις διαδικασίες στην αγροτική οικονομία. Η διαδικασία αυτή συνεπάγεται την αφαίρεση υγρασίας από τα προϊόντα, κάτι το οποίο αποτρέπει την ανάπτυξη μικροοργανισμών και επιμηκύνει τη διάρκεια ζωής τους, διατηρώντας παράλληλα τη διατροφική τους αξία.

Η ξήρανση ως διαδικασία έχει ρίζες που εκτείνονται αιώνες πίσω, όπου οι πρώτοι αγρότες εξάρτησαν τη συντήρηση των τροφίμων τους από τη φυσική ξήρανση υπό τον ήλιο. Στη σύγχρονη εποχή, η ξήρανση έχει εξελιχθεί σε μια πιο ελεγχόμενη και αυτοματοποιημένη διαδικασία, χρησιμοποιώντας σύγχρονα μηχανήματα και τεχνολογία (Zhihan, et al., 2021).

Οι μέθοδοι ξήρανσης ποικίλλουν ανάλογα με το είδος του προϊόντος και τις ειδικές απαιτήσεις που έχει. Περιλαμβάνουν τη φυσική ξήρανση (π.χ., ξήρανση υπό τον ήλιο), τη θερμική ξήρανση (με τη χρήση θερμού αέρα) και την αφυγραντική ξήρανση (που αφαιρεί υγρασία μέσω ξηρού αέρα).

Η ξήρανση πρέπει να γίνεται με προσοχή, καθώς η υπερβολική ή ανεπαρκής αφαίρεση υγρασίας μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τη γεύση, τη δομή και τη διατροφική αξία των προϊόντων. Επιπλέον, η ξήρανση μπορεί να επηρεάσει την εμφάνιση και την εμπορική αξία των προϊόντων.

Η ξήρανση των αγροτικών προϊόντων παραμένει μια κρίσιμη διαδικασία στην αγροτική παραγωγή. Με την πρόοδο της τεχνολογίας και την αυξανόμενη ζήτηση για υψηλής ποιότητας τρόφιμα, οι μέθοδοι ξήρανσης εξελίσσονται συνεχώς, προσφέροντας νέες προκλήσεις και ευκαιρίες στους παραγωγούς και στην αγορά.

1.2.1 Μέθοδοι ξήρανσης

Η ξήρανση των αγροτικών προϊόντων είναι μία διαδικασία ουσιαστικής σημασίας, που επιτρέπει την παράταση της διάρκειας ζωής των προϊόντων και τη διατήρηση της διατροφικής τους αξίας. Μέσα από την αφαίρεση της υγρασίας, τα προϊόντα γίνονται λιγότερο ευάλωτα σε αλλοίωση και διατηρούνται για μεγαλύτερες χρονικές περιόδους.

1) Η πιο παραδοσιακή μέθοδος ξήρανσης είναι η φυσική ξήρανση, γνωστή και ως ξήρανση υπό τον ήλιο. Σε αυτή τη μέθοδο, τα προϊόντα απλώνονται σε μεγάλες επιφάνειες υπό την άμεση επίδραση του ηλιακού φωτός. Παρόλο που αυτή η τεχνική είναι οικονομική και σχετικά απλή στην εφαρμογή της, εξαρτάται σημαντικά από τις καιρικές συνθήκες και μπορεί να χρειάζεται αρκετές ημέρες για να ολοκληρωθεί. Επιπλέον, ο κίνδυνος μόλυνσης από εξωτερικούς παράγοντες όπως η σκόνη, τα έντομα ή τα πτηνά παραμένει μια συνεχής ανησυχία (Karathanos & Belessiotis, 1997). Αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί με διάφορες παραποιήσεις όπως:

- Ξήρανση με άμεση έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία.



Εικόνα 1.1 - Ξήρανση σταφίδας με άμεση έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία μαύρης Κορινθιακής σταφίδας. [Belessiotis Delyannis, 2011]

- Ξήρανση με ηλιακή ακτινοβολία χρησιμοποιώντας το φαινόμενο του θερμοκηπίου.



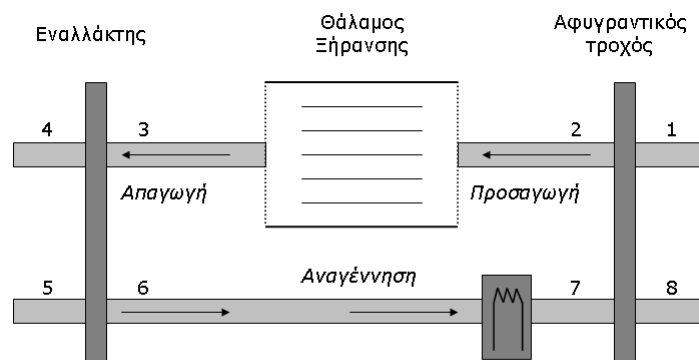
Εικόνα 1.2 - Ξήρανση με χρήση φαινομένου του θερμοκηπίου μαύρης Κορινθιακής σταφίδας. (Belessiotis & Delyannis, 2011)

- Ξήρανση υπό σκιερό μέρος.



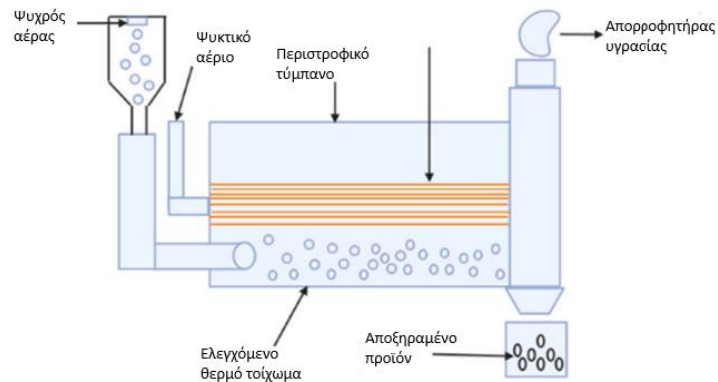
Εικόνα 1.3 - Ξήρανση σταφυλιών σουλτανίνα υπό σκιά. (Belessiotis & Delyannis, 2011)

- 2) Η θερμική ξήρανση, αντίθετα, είναι μια πιο ελεγχόμενη διαδικασία, όπου χρησιμοποιείται θερμός αέρας για να απομακρύνει την υγρασία από τα προϊόντα. Αυτή η τεχνική είναι πιο αποτελεσματική και γρηγορότερη από την φυσική ξήρανση, και δεν εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες. Ωστόσο, απαιτεί τη χρήση ειδικών μηχανημάτων και μπορεί να καταναλώνει σημαντική ποσότητα ενέργειας. Αποτελεί την συνηθέστερη μέθοδο ξήρανσης και οι τύποι ξηραντήριων θα παρουσιαστούν αναλυτικότερα στο επόμενο υποκεφάλαιο.
- 3) Η αφυγραντική ξήρανση, άλλη μια δημοφιλής μέθοδος, χρησιμοποιεί ξηρό αέρα για να απομακρύνει την υγρασία, μειώνοντας την πιθανότητα αλλοίωσης των προϊόντων από τη θερμότητα. Αυτή η τεχνική είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για προϊόντα ευαίσθητα στην υψηλή θερμοκρασία και προσφέρει υψηλή ενεργειακή απόδοση, αλλά απαιτεί πιο σύνθετο εξοπλισμό.



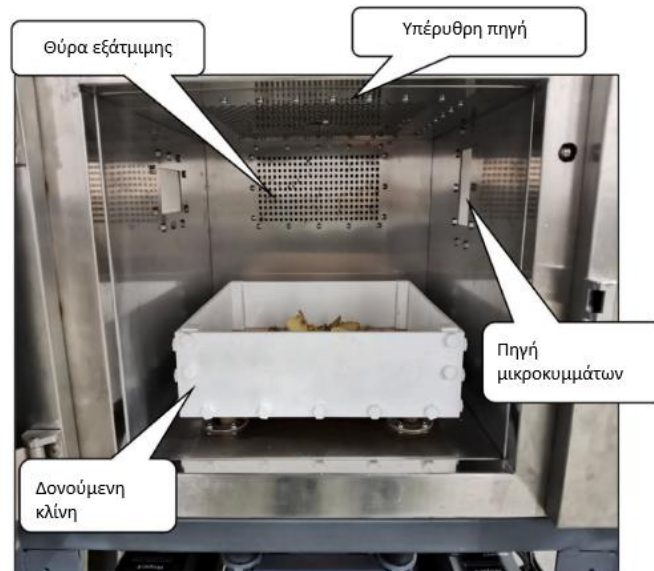
Εικόνα 1.4 - Διάταξη Ξηραντήριου με τροχό αφύγρυνσης. (Διαμαντόπουλος, 2013)

- 4) Η ψύχρανση, γνωστή και ως freeze-drying, είναι μια μέθοδος όπου τα προϊόντα αρχικά παγώνουν και στη συνέχεια η υγρασία αφαιρείται μέσω υποβάθρου. Αυτή η διαδικασία διατηρεί σχεδόν αναλλοίωτη τη διατροφική αξία και τη γεύση των προϊόντων, αλλά είναι πιο δαπανηρή και απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό.



Εικόνα 1.5 - Διάταξη ξηραντήριου με δυναμική ψύχρανση. [Chhabra, Arora, Garg, Samota, 2023]

- 5) Τέλος, η μικροκυματική ξήρανση χρησιμοποιεί μικροκύματα για να θερμαίνει και να αφυγραίνει τα προϊόντα. Αυτή η τεχνική είναι γρήγορη και αποδοτική, αλλά μπορεί να μην είναι πάντα ομοιογενής σε όλο το όγκο του προϊόντος.



Εικόνα 1.6 - Ξηραντήριο μικροκυματικής ξήρανσης.

Κάθε μία από αυτές τις μεθόδους ξήρανσης έχει τα δικά της μοναδικά πλεονεκτήματα και περιορισμούς. Γεγονός που χρήζει ιδιαίτερα σημαντική την βαθιά γνώση και αντίληψη των

παραγωγών ως προς τα χαρακτηριστικά και τις ανάγκες του κάθε προϊόντος. Η επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου εξαρτάται από παράγοντες όπως η ευαισθησία του προϊόντος στη θερμότητα, η επιθυμητή ταχύτητα της διαδικασίας, οι διαθέσιμοι πόροι και οι περιβαλλοντικές συνθήκες. Επιπροσθέτως, οι παραγωγοί πρέπει να λαμβάνουν υπόψη την ενέργεια και το κόστος που απαιτείται για κάθε μέθοδο, καθώς και την επίδρασή της στην ποιότητα και τη διατήρηση του τελικού προϊόντος. Η σωστή επιλογή και εφαρμογή της μεθόδου ξήρανσης μπορεί να επιφέρει σημαντικά οφέλη όπως τη βελτίωση της αποδοτικότητας, την αύξηση της διάρκειας ζωής των προϊόντων και την εξασφάλιση υψηλότερης ποιότητας τροφίμων.

1.3 Καλλιέργειες καρυδιού στην Ελλάδα

Η καλλιέργεια του καρυδιού στην Ελλάδα αποτελεί μία παραδοσιακή και σημαντική αγροτική δραστηριότητα, με βαθιές ρίζες στην ελληνική γεωργική ιστορία. Η καρυδιά, που είναι γνωστή για τους υψηλής ποιότητας καρπούς της, καλλιεργείται κυρίως σε ημιορεινές και ορεινές περιοχές της χώρας, όπου το κλίμα και το έδαφος είναι ιδανικά για την ανάπτυξή της. Την τελευταία δεκαετία, η καλλιέργεια της καρυδιάς και η εγκατάσταση σύγχρονων καρυδεώνων έχουν παρατηρηθεί ως αρκετά δημοφιλή στόχοι ανάμεσα στους καλλιεργητές της χώρας με πιο διαδεδομένη ποικιλία καρυδιάς να είναι η Chandler.

Οι περιοχές όπου παρατηρείται η μεγαλύτερη καλλιέργεια καρυδιών στην Ελλάδα περιλαμβάνουν την Ήπειρο, την Πελοπόννησο, καθώς και τη Μακεδονία. Ειδικότερα, οι περιοχές της Άρτας, της Καστοριάς και της Πέλλας ξεχωρίζουν για την ποιότητα των καρυδιών τους. Η καρυδιά αναπτύσσεται καλύτερα σε βαθιά, υγρά και καλά αποστραγγιζόμενα εδάφη, ενώ αποφεύγεται η καλλιέργεια σε περιοχές με συχνές παγετούς ή σε εδάφη με υψηλό ποσοστό αλατότητας.

Η καλλιέργεια του καρυδιού στην Ελλάδα δεν απαιτεί ιδιαίτερα εντατικές γεωργικές πρακτικές. Η φύτευση των δένδρων γίνεται σε διαστήματα που επιτρέπουν την επαρκή ηλιοφάνεια και αερισμό, ενώ η λίπανση και η πότιση πρέπει να γίνονται με μέτρο. Η συνηθέστερη τεχνική φύτευσης, όσον αφορά την απόσταση ανάμεσα στα δένδρα, είναι αυτή με μήκος 10-12 μέτρα γνωστή και ως ημιεντατική (Anon., n.d.). Σημαντικό στοιχείο αποτελεί η προστασία των δένδρων από διάφορες ασθένειες και παράσιτα, με την εφαρμογή κατάλληλων φυτοπροστατευτικών μέτρων.

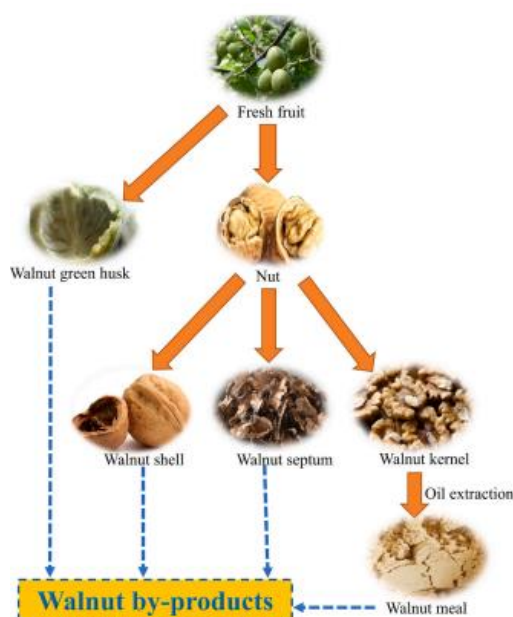
Η συγκομιδή των καρυδιών συνήθως πραγματοποιείται τον Σεπτέμβριο και τον Οκτώβριο. Οι καρποί συλλέγονται όταν η εξωτερική πράσινη όψη τους σπάει και αποκαλύπτει τον σκληρό εσωτερικό κέλυφος. Μετά τη συγκομιδή, τα καρύδια υπόκεινται σε διαδικασίες καθαρισμού και ξήρανσης, προτού είναι έτοιμα για την αγορά.

Σημαντικός παράγοντας για την επιτυχία της καρυδιάς είναι η ανάπτυξη νέων και βελτιωμένων ποικιλιών, που να είναι πιο ανθεκτικές στις ασθένειες και να παράγουν υψηλότερης ποιότητας καρπούς. Παράλληλα, μεγάλη σημασία έχει και η ανάπτυξη και εφαρμογή βιώσιμων γεωργικών πρακτικών που σέβονται το περιβάλλον και διασφαλίζουν τη βιωσιμότητα της καλλιέργειας.

Στην Ελλάδα, η καλλιέργεια καρυδιού συνδυάζεται συχνά με τον αγροτουρισμό, αποτελώντας μια επιπρόσθετη πηγή εισοδήματος για τους αγρότες και προσφέροντας στους επισκέπτες μια μοναδική εμπειρία επαφής με τη φύση και την παραδοσιακή γεωργική ζωή.

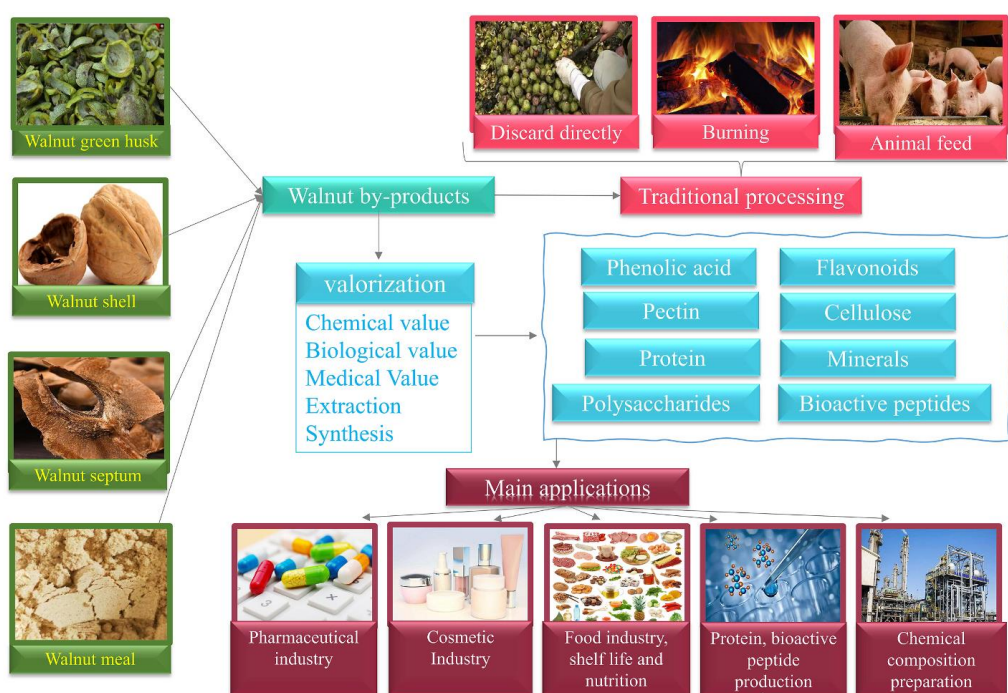
1.4 Γεωργικά απόβλητα και κυκλική οικονομία

Η κυκλική οικονομία στον γεωργικό τομέα αναφέρεται στην ιδέα της επαναχρησιμοποίησης και αξιοποίησης των γεωργικών αποβλήτων με τρόπο που μειώνει την απόβλητη ύλη και ενισχύει την αειφόρο ανάπτυξη. Τα γεωργικά απόβλητα περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα υλικών, από υπολείμματα καλλιεργειών όπως κοτσάνια, φύλλα και κλαδιά, μέχρι απόβλητα από την κτηνοτροφία, όπως η κοπριά.



Εικόνα 1.7 - Παρουσίαση δομής καρυδιού. [Zhu, Ting, Hongjie, Huaide, Zisheng, 2023]

Η αξιοποίηση αυτών των αποβλήτων μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους. Για παράδειγμα, η κοπριά και άλλα οργανικά απόβλητα μπορούν να μετατραπούν σε βιοαέριο, παρέχοντας μια σημαντική πηγή ανανεώσιμης ενέργειας. Επιπλέον, τα γεωργικά απόβλητα μπορούν να μετατραπούν σε οργανικά λιπάσματα, βελτιώνοντας την ποιότητα του εδάφους και μειώνοντας την ανάγκη για συνθετικά λιπάσματα (<https://ypen.gov.gr/>, χ.χ.). Συγκεκριμένα το καρύδι, όντας το κέντρο ενδιαφέροντος την διπλωματικής εργασίας, παρουσιάζει ένα ικανοποιητικό πλήθος αποβλήτων κατά την επεξεργασία αλλά και υποπροϊόντων που μπορούν να φανούν χρήσιμα κατά την αξιοποίησή τους στα πλαίσια της κυκλικής οικονομίας.



Εικόνα 1.8 - Ταξινόμηση, βιοδραστικές ενώσεις που λαμβάνονται και δυναμικές εφαρμογές των παραπροϊόντων του καρυδιού. (Zhu, et al., 2023)

Στην Ελλάδα, η εφαρμογή της κυκλικής οικονομίας στον γεωργικό τομέα είναι ένας σχετικά νέος τομέας ανάπτυξης, αλλά με μεγάλο δυναμικό. Η χώρα, με την πλούσια γεωργική της παραγωγή, παράγει σημαντικές ποσότητες γεωργικών αποβλήτων που μέχρι πρόσφατα θεωρούνταν απλώς ως απόβλητα. Ωστόσο, με την αυξανόμενη επίγνωση για την αειφόρο ανάπτυξη και την ανάγκη για πιο βιώσιμες πρακτικές, τα γεωργικά απόβλητα αρχίζουν να αναγνωρίζονται ως πολύτιμος πόρος.

Στο πλαίσιο της παραγωγής βιοαερίου, η Ελλάδα έχει αρχίσει να αναπτύσσει εγκαταστάσεις που μετατρέπουν τα γεωργικά απόβλητα σε ενέργεια. Αυτό όχι μόνο μειώνει την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα αλλά και βοηθά στην μείωση των εκπομπών των αερίων του

θερμοκηπίου. Επιπρόσθετα, η χρήση των γεωργικών αποβλήτων ως οργανικών λιπασμάτων συμβάλλει στη βελτίωση της ποιότητας του εδάφους και προάγει τις αειφόρες γεωργικές πρακτικές.

Η έρευνα και ανάπτυξη νέων τεχνολογιών για την αποδοτικότερη αξιοποίηση των γεωργικών αποβλήτων είναι επίσης σε εξέλιξη. Τέτοιες τεχνολογίες περιλαμβάνουν την βιομετατροπή για την παραγωγή βιοκαυσίμων ή άλλων βιοπροϊόντων, όπως βιοπλαστικά και βιοενζύματα, που προσφέρουν ανανεώσιμες και πιο βιώσιμες εναλλακτικές στα παραδοσιακά πετρελαιοειδή προϊόντα. Εκτός από την ενεργειακή αξιοποίηση, οι νέες αυτές τεχνολογίες εστιάζουν στην κλειστή κυκλική χρήση των υλικών, μειώνοντας τα απόβλητα και αξιοποιώντας τα γεωργικά υποπροϊόντα σε τομείς όπως η γεωργία, η ζωοτροφή και η φαρμακευτική βιομηχανία.

Επιπρόσθετα, η έρευνα στην Ελλάδα επικεντρώνεται επίσης στην ανάπτυξη βιοδιεργασιών για την αποδοτική διαχείριση των γεωργικών αποβλήτων. Μέσω τέτοιων διεργασιών, τα απόβλητα μετατρέπονται σε χρήσιμα προϊόντα όπως βιολογικά λιπάσματα, προσφέροντας ένα βιώσιμο τρόπο ενίσχυσης της γεωργικής παραγωγής και ταυτόχρονα προστατεύοντας το περιβάλλον από την επιβάρυνση των χημικών λιπασμάτων.

Αυτή η εξέλιξη στον τομέα της κυκλικής οικονομίας αντικατοπτρίζει μια συνεχώς αυξανόμενη αναγνώριση της αξίας των γεωργικών αποβλήτων ως πόρων, αντί για απλά απόβλητα. Τέτοιες προσεγγίσεις δεν μειώνουν μόνο την περιβαλλοντική επίπτωση της γεωργικής παραγωγής, αλλά παρέχουν επίσης νέες ευκαιρίες για οικονομική ανάπτυξη και καινοτομία στον αγροτικό τομέα της Ελλάδας.

1.5 Βιομάζα

1.5.1 Ορισμός βιομάζας

Η βιομάζα αποτελεί την αρχαιότερη γνωστή πηγή ενέργειας, χρησιμοποιούμενη ακόμη και από τον πρωτόγονο άνθρωπο για θέρμανση και μαγείρεμα. Η ενέργεια που παράγεται από την καύση ξύλινης βιομάζας, ενός τύπου βιομάζας, χρησιμοποιούνταν για τις θερμικές ανάγκες του ανθρώπου. Στην κατηγορία της βιομάζας εντάσσονται διάφορα υλικά που προέρχονται από ζωντανούς οργανισμούς, όπως τα δασικά προϊόντα, τα γεωργικά υπολείμματα, τα κτηνοτροφικά απόβλητα και τα απόβλητα τροφίμων. Μέσω κατάλληλων

θερμοχημικών διεργασιών, αυτά τα υλικά μπορούν να μετατραπούν σε βιοκαύσιμα ή να παράγουν απευθείας ενέργεια (Κατσίρη, 2010-2011).

Η βιομάζα προκύπτει από τη φωτοσυνθετική δραστηριότητα των φυτών, τόσο χερσαίων όσο και υδρόβιων. Αυτή η βιοενέργεια, γνωστή επίσης ως πράσινη ενέργεια, αποτελεί ουσιαστικά δευτερογενή ηλιακή ενέργεια, δεδομένου ότι οι φυτικοί οργανισμοί μετατρέπουν το διοξείδιο του άνθρακα και το νερό σε σάκχαρα και οξυγόνο, χρησιμοποιώντας ηλιακή ακτινοβολία. Αυτή η διαδικασία μπορεί να αναπαρασταθεί με την ακόλουθη χημική εξίσωση:



Επομένως, κατά τη φωτοσύνθεση συντίθενται οργανικές ενώσεις (υδρογονάνθρακες), οι οποίες αποτελούν τη βιομάζα. Μετά τη δημιουργία της βιομάζας, αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ενεργειακή πηγή. Θεωρείται ανανεώσιμη διότι αποτελεί αποθηκευμένη ηλιακή ενέργεια από τα φυτά κατά τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης (Δαβόρας, 2009). Σε πολλές περιοχές του πλανήτη, όπως στην Αφρική και στην Ινδία, πληθυσμοί εξαρτώνται ακόμη από τη βιομάζα για την κάλυψη των βασικών τους αναγκών, χρησιμοποιώντας ξύλα, φυτικά υπολείμματα και ζωικά απόβλητα.

Συνοψίζοντας, τα υλικά που προέρχονται από το φυτικό και ζωικό βασίλειο, καθώς και τα υγρά απόβλητα και τα περισσότερα αστικά απορρίμματα, μπορούν να επεξεργαστούν και να μετατραπούν σε πηγές ενέργειας, παρέχοντας μια σημαντική δυνατότητα για την βιώσιμη ανάπτυξη.

1.5.2 Βασικές πρώτες ύλες βιομάζας

Όπως έχει παρουσιάσει και συγκεντρωτικά ο (Δαβής, 2016) οι βασικές πρώτες ύλες προέρχονται από τα εξής πλαίσια:

- Στο πλαίσιο της υλοτομίας και της βιομηχανίας επεξεργασίας ξύλου, παράγονται διάφορα ξυλώδη υπολείμματα, τα οποία περιλαμβάνουν τα πριονίδια, τα ροκανίδια και τα θρύμματα ξύλου. Επιπρόσθετα, υπάρχουν υπολείμματα ξυλείας που προκύπτουν κατά τη διαδικασία υλοτομίας των δέντρων και δεν είναι περαιτέρω επεξεργάσιμα. Αυτά τα υλικά εντάσσονται στην κατηγορία της βιομάζας και μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή βιοενέργειας, είτε για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είτε για θερμικές εφαρμογές.

Η χρήση των ξυλωδών υπολειμμάτων ως πηγής για την παραγωγή ενέργειας παρουσιάζει σημαντικές περιβαλλοντικές και βιομηχανικές ευκαιρίες. Αυτή η μορφή ανακύκλωσης βοηθά στην μείωση των αποβλήτων και στην ενίσχυση της βιωσιμότητας του ξυλευτικού τομέα, μετατρέποντας παραπροϊόντα που προηγουμένως θεωρούνταν ανεκμετάλλευτα σε πολύτιμες πηγές ενέργειας. Η διαδικασία αυτή συμβάλλει επίσης στη μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα και προωθεί την χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Επιπρόσθετα, η έρευνα στον τομέα της θερμοχημικής μετατροπής της βιομάζας παρέχει περαιτέρω δυνατότητες για την ανάπτυξη αποδοτικότερων και πιο βιώσιμων τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας. Μέσω της βελτιστοποίησης των διαδικασιών καύσης, αεριοποίησης και πυρόλυσης, είναι δυνατόν να αυξηθεί η απόδοση της ενέργειας που αποκτάται από την βιομάζα, προσφέροντας συνεπώς μια βιώσιμη λύση στις ενεργειακές ανάγκες του σύγχρονου κόσμου.

- Στο πλαίσιο των γεωργικών δραστηριοτήτων, αναγνωρίζονται διάφορα γεωργικά υποπροϊόντα, όπως τα υπολείμματα από το κλάδεμα δέντρων, το άχυρο και άλλα ανεκμετάλλευτα υλικά που παραμένουν στους αγρούς. Αυτά τα υποπροϊόντα προσφέρουν τη δυνατότητα εναλλακτικής αξιοποίησης για την παραγωγή οικολογικά βιώσιμης ενέργειας και καυσίμων. Επιπρόσθετα, η επεξεργασία των γεωργικών υπολειμμάτων μετατρέπει πιθανές εστίες ανάπτυξης πυρκαγιών κατά τους θερινούς μήνες σε ασφαλή και χρήσιμα προϊόντα, παρέχοντας έτσι διπλό όφελος τόσο για την προστασία του περιβάλλοντος όσο και για την παραγωγή επιπλέον εσόδων για τους παραγωγούς.

Οι ενεργειακές καλλιέργειες, όπως εκείνες με δένδρα ταχείας ανάπτυξης, αναπτύσσονται επίσης για την παραγωγή ενέργειας, όπως αέρια βιοκαύσιμα (βιοαέριο) και στερεά βιοκαύσιμα (πέλετς). Η διαδικασία παραγωγής στερεών βιοκαυσίμων από τέτοιες καλλιέργειες είναι αντικείμενο εντατικής ερευνητικής και βιομηχανικής δραστηριότητας, με στόχο την ανάπτυξη αποδοτικών, βιώσιμων και περιβαλλοντικά αποδεκτών πρακτικών. Η μετατροπή αυτών των υλικών σε ενέργεια είναι μέρος μιας ευρύτερης στρατηγικής για τη μείωση της εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα και την ενθάρρυνση της χρήσης ανανεώσιμων πηγών, συμβάλλοντας έτσι στη διαμόρφωση μιας πιο βιώσιμης ενεργειακής μορφολογίας.

- Στο πλαίσιο των κτηνοτροφικών δραστηριοτήτων, το πλέον σημαντικό απόβλητο αποτελεί η ζωική κοπριά, ιδίως σε μονάδες μαζικής εκτροφής βοοειδών, χοίρων και πουλερικών, όπου οι ποσότητες αυτών των αποβλήτων είναι εξαιρετικά μεγάλες. Η βέλτιστη διαχείριση αυτών των αποβλήτων επιτυγχάνεται μέσω της μετατροπής τους σε βιοενέργεια. Η αναερόβια χώνευση, μία προηγμένη τεχνολογική διαδικασία, επιτρέπει τη μετατροπή των υγρών ζωικών αποβλήτων σε βιοαέριο, το οποίο αποτελεί ένα βιώσιμο και οικολογικά φιλικό βιοκαύσιμο. Το παραγόμενο βιοαέριο μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα μέσω συστημάτων συμπαραγωγής, με τα έσοδα από την πώληση αυτής της ενέργειας να συνιστούν σημαντικό κομμάτι του οικονομικού οφέλους της μονάδας βιοαερίου. Επιπρόσθετα, το χωνεμένο υπόλειμμα της κοπριάς, μετά τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης, προσφέρει επιπλέον οικονομική αξία μέσω της εμπορικής εκμετάλλευσης ως βιολογικό λίπασμα.

Συνοψίζοντας, η ζωική βιομάζα που προέρχεται από την εκτροφή ζώων αποτελεί μια ζωτικής σημασίας πηγή εσόδων για τους κτηνοτρόφους και παράλληλα διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην παραγωγή περιβαλλοντικά φιλικής ηλεκτρικής ενέργειας. Η αναερόβια χώνευση και η μεταποίηση της ζωικής κοπριάς εντάσσονται στις πρωτοποριακές διαδικασίες που συμβάλλουν στην προώθηση της αειφορίας και της κυκλικής οικονομίας στον κτηνοτροφικό τομέα.

- Στο πλαίσιο της βιομηχανίας παραγωγής τροφίμων, η διαχείριση αποβλήτων αποτελεί ένα κρίσιμο ζήτημα, όπου η αναερόβια χώνευση αποτελεί μία από τις βασικές μεθόδους επεξεργασίας, τόσο για υγρά όσο και για στερεά βιομηχανικά απόβλητα. Αυτή η μέθοδος μετατρέπει τα απόβλητα σε βιοαέριο, μια βιώσιμη ενεργειακή πηγή, και μειώνει σημαντικά την περιβαλλοντική επιβάρυνση.

Συγκεκριμένα, υγρά απόβλητα όπως τα υποπροϊόντα τυροκομίας, απόβλητα σφαγείων, και απόβλητα από χυμοποιεία και ζυθοποιεία μετατρέπονται μέσω αναερόβιας χώνευσης σε βιοαέριο και συνεισφέρουν στη μείωση του ρίσκου περιβαλλοντικής υποβάθμισης των υδάτινων συστημάτων. Επιπλέον, η ενεργειακή αξιοποίηση των αποβλήτων παρέχει οικονομικά οφέλη στους παραγωγούς, μέσω της πώλησης της παραγόμενης ενέργειας και της αποφυγής προστίμων για ακατάλληλη διάθεση αποβλήτων.

Όσον αφορά στα στερεά βιομηχανικά απόβλητα, η ανάπτυξη αποτελεσματικών

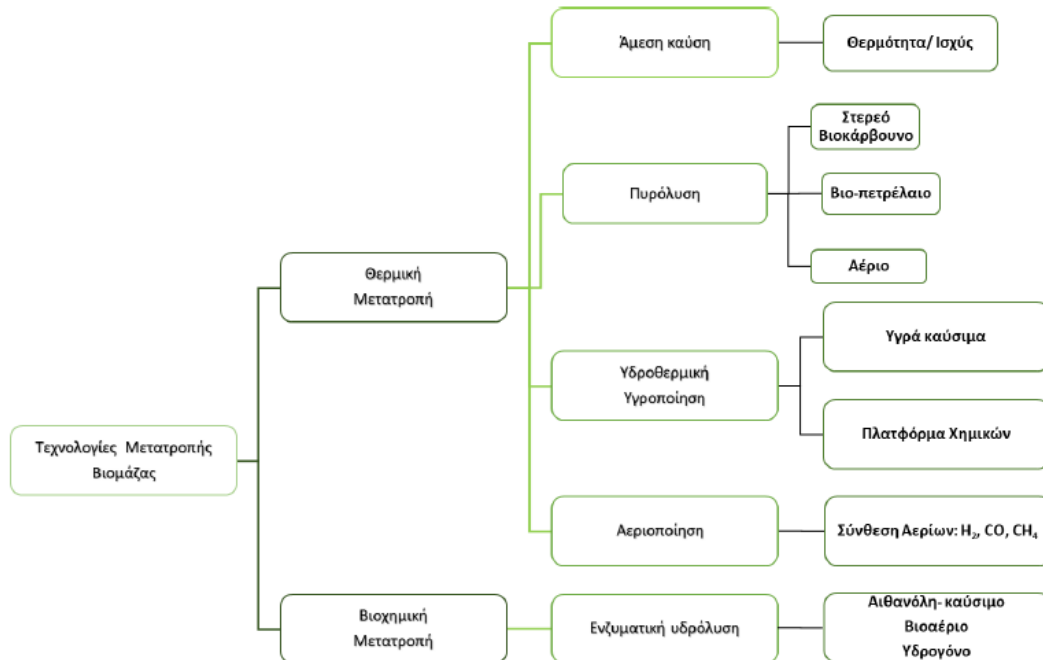
τεχνολογιών για την παραγωγή βιοαερίου και ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί επίσης έναν σημαντικό τομέα ερευνητικής καινοτομίας. Για την υλοποίηση τεχνολογικά αρτιωμένων μονάδων παραγωγής βιοενέργειας, συχνά απαιτείται συνεργασία μεταξύ των παραγωγών ζωικών αποβλήτων και των παραγωγών οργανικών βιομηχανικών αποβλήτων. Τέτοιες εγκαταστάσεις συνδυασμένης αναερόβιας χώνευσης επιτρέπουν την αποδοτική ενεργειακή μετατροπή των αποβλήτων, ενώ παράλληλα προσφέρουν σημαντικά περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη. (Δαβόρας, 2009)

1.5.3 Μέθοδοι για τη μετατροπή βιομάζας σε ενέργεια

Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες τεχνικών για την επεξεργασία της βιομάζας σε βιοενέργεια:

- 1 τεχνικές θερμοχημικής μετατροπής
- 2 τεχνικές βιοχημικής αποσύνθεσης συμπεριλαμβανομένης της αναερόβιας αποσύνθεσης και ζύμωσης,

όπως συνοψίζονται στο παρακάτω σχήμα (Wu et al., 2022):

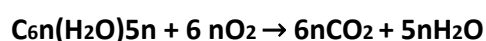


Σχήμα 1.1 – Θερμοχημικές και βιοχημικές οδοί μετατροπής για χρήση βιομάζας. (Wu et al., 2022)

Η άμεση καύση της βιομάζας αναγνωρίζεται ως η πιο βασική και άμεση μέθοδος για την απελευθέρωση της ενέργειας που περιέχεται στη βιομάζα. Αυτή η διαδικασία εμπλέκει την [21]

καύση της βιομάζας, η οποία πρέπει πρώτα να υποβληθεί σε διαδικασία κατεργασίας για να μετατραπεί σε μικρότερα μεγέθη. Η διαδικασία αυτή της λεπτής κοπής ή τρίψης είναι κρίσιμη για την αποδοτική καύση, καθώς διασφαλίζει την ομοιόμορφη κατανομή θερμότητας και την πλήρη καύση του υλικού. Σε πολλές περιπτώσεις, η λεπτή τριβή της βιομάζας καθίσταται απαραίτητη για τη χρήση της σε ειδικά σχεδιασμένους λέβητες καύσης (Wu et al., 2022).

Κατά την καύση, η βιομάζα στη μορφή εξαιρετικά λεπτών κόκκων μπορεί να επιτύχει θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 1000 έως 1500 βαθμούς Κελσίου. Αυτό είναι σημαντικό για την αποδοτική μετατροπή της χημικής ενέργειας της βιομάζας σε θερμική ενέργεια. Η τυπική χημική αντίδραση που λαμβάνει χώρα κατά την καύση της βιομάζας είναι μια αντίδραση οξειδωσης, όπου ο άνθρακας και το υδρογόνο που περιέχονται στη βιομάζα αντιδρούν με το οξυγόνο του αέρα, παράγοντας θερμότητα, διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Η αντίδραση αυτή έχει την εξής μορφή:



1.6 Συστήματα θέρμανσης βιομάζας

Τα συστήματα θέρμανσης που λειτουργούν με βάση τη βιομάζα αναδεικνύονται σε μία από τις προηγμένες και βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις θέρμανσης, τόσο για οικιακούς χώρους και για επαγγελματικές εγκαταστάσεις όσο και για βιομηχανικές λειτουργίες και διαδικασίες, όπως αυτή της ξήρανσης αγροτικών προϊόντων. Αυτή η τεχνολογία αντιπροσωπεύει μία σημαντική αναβάθμιση σε σχέση με τα παραδοσιακά συστήματα θέρμανσης που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα, όπως το πετρέλαιο, καθώς προσφέρει πολλαπλά πλεονεκτήματα από περιβαλλοντική και οικονομική άποψη.

Η βιομάζα, ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, επιτρέπει τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου συγκριτικά με τα ορυκτά καύσιμα, συμβάλλοντας έτσι στην καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής. Η χρήση βιομάζας για θέρμανση αποτελεί επίσης έναν τρόπο ενθάρρυνσης της κυκλικής οικονομίας, καθώς προάγει την αξιοποίηση βιολογικών αποβλήτων και παραπροϊόντων από διάφορες βιομηχανικές διαδικασίες.

Από οικονομικής άποψης, τα συστήματα θέρμανσης με βιομάζα μπορούν να προσφέρουν σημαντική μείωση στο κόστος ενέργειας σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους, λαμβάνοντας υπόψη την αυξανόμενη τιμή των ορυκτών καυσίμων και την πιθανή επιβολή

φόρων στις εκπομπές CO₂. Επιπλέον, τα συστήματα αυτά ενισχύουν την ενεργειακή ασφάλεια μέσω της διαφοροποίησης των πηγών ενέργειας και της μείωσης της εξάρτησης από εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα.

Οι πιο συνηθισμένοι τύποι συστημάτων θέρμανσης βιομάζας περιλαμβάνουν τους ακόλουθους:

- Ενεργειακό τζάκι βιομάζας

Το ενεργειακό τζάκι που λειτουργεί με βάση τη βιομάζα αποτελεί μια υψηλής αποδοτικότητας ενεργειακή λύση, με τις αποδόσεις του να φθάνουν έως και 84%. Η ισχύς του εν λόγω συστήματος είναι άμεσα συνδεδεμένη με το είδος και την ποιότητα της καύσιμης ύλης που χρησιμοποιείται, η οποία μπορεί να ποικίλλει από στερεά βιομάζα όπως ξύλα, πέλετ και βιομάζα σε κόκκους, μέχρι βιοκαύσιμα.

Αυτό το ενεργειακό τζάκι βιομάζας διακρίνεται για την ευελιξία του στην ενσωμάτωση με διάφορα συστήματα μεταφοράς θερμότητας. Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να ενσωματωθεί αποτελεσματικά σε υφιστάμενα δίκτυα καλοριφέρ, παρέχοντας κεντρική θέρμανση σε όλους τους χώρους μιας κατοικίας ή επαγγελματικού χώρου. Επιπλέον, μπορεί να λειτουργήσει μέσω συστημάτων εξαναγκασμένης συναγωγής, χρησιμοποιώντας ανεμιστήρες για τη διανομή της θερμότητας μέσω καναλιών σε διάφορα σημεία του χώρου.



Εικόνα 1.8 – Ενεργειακό τζάκι βιομάζας.
(thermansipress.gr, χ.χ.)

Η υψηλή αποδοτικότητα του ενεργειακού τζακιού βιομάζας είναι σημαντική και από περιβαλλοντικής άποψης, καθώς συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου λόγω της αποδοτικής καύσης και της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Επιπρόσθετα, η ευελιξία του στην ενσωμάτωση με διαφορετικά συστήματα διανομής θερμότητας το καθιστά ιδανική επιλογή για ποικίλες εφαρμογές και αρχιτεκτονικές απαιτήσεις. (thermansipress.gr, χ.χ.)

- Σόμπα βιομάζας

Οι σόμπες που καταναλώνουν βιομάζα ως καύσιμο υλικό είναι συσκευές υψηλής αποδοτικότητας, με τις αποδόσεις τους να φθάνουν έως και το εντυπωσιακό ποσοστό του 92%. Η ισχύς των συσκευών αυτών εξαρτάται άμεσα από την ποιότητα και το είδος της καύσιμης ύλης που χρησιμοποιείται, η οποία μπορεί να ποικίλει από στερεά βιομάζα όπως ξυλοπέλετ, καυσόξυλα, ή ακόμη και αγροτικά απόβλητα (toumazatos.gr, χ.χ.).

Η λειτουργία των σόμπων βιομάζας είναι σχετικά απλή και αποδοτική. Στη βάση της λειτουργίας τους βρίσκεται η διαδικασία καύσης, κατά την οποία η θερμότητα που παράγεται διοχετεύεται στον χώρο μέσω ειδικών αεραγωγών. Αυτοί οι αεραγωγοί είναι σχεδιασμένοι για να επιτρέπουν την ομοιόμορφη και αποτελεσματική διανομή του θερμού αέρα, βελτιστοποιώντας έτσι την απόδοση θέρμανσης του χώρου.



Εικόνα 1.9 – Σόμπα βιομάζας. (toumazatos.gr, χ.χ.)

Οι σόμπες βιομάζας έχουν βρει ευρεία εφαρμογή σε μικρότερους χώρους λόγω της ικανότητάς τους να παράγουν αποδοτικά θερμότητα σε συγκεκριμένες περιοχές, αποφεύγοντας τις απώλειες ενέργειας που είναι συνήθως συνδεδεμένες με μεγαλύτερα συστήματα θέρμανσης.

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι οι σύγχρονες σόμπες βιομάζας έχουν ενσωματωθεί με προηγμένες τεχνολογίες για βελτιωμένη αποδοτικότητα καύσης και ελεγχόμενη εκπομπή αερίων, προσφέροντας έτσι μια πιο καθαρή και αποδοτική εναλλακτική στις συμβατικές μορφές θέρμανσης.

- Ενεργειακός λέβητας και αερολέβητας βιομάζας

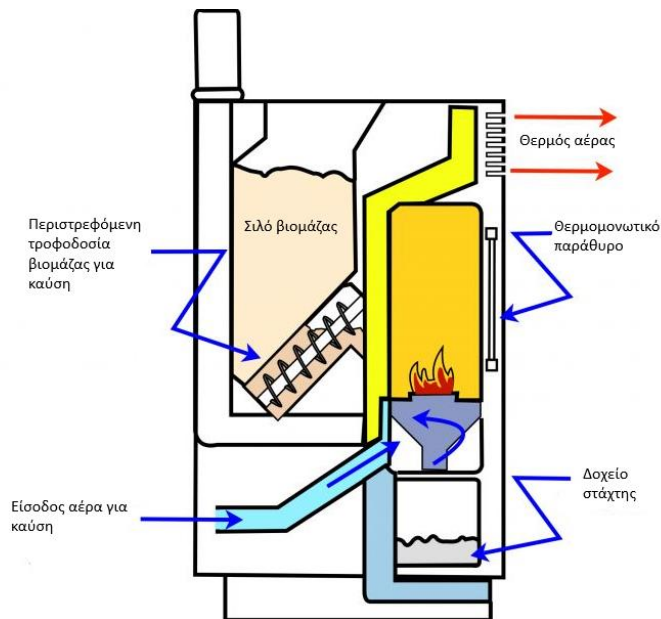
Οι λέβητες βιομάζας λειτουργούν βασιζόμενοι σε έναν μηχανισμό που είναι ουσιαστικά παρόμοιος με αυτόν των παραδοσιακών λεβήτων πετρελαίου, αλλά με τη σημαντική διαφορά της χρήσης βιομάζας ως πηγής ενέργειας. Στην καρδιά του συστήματος βρίσκεται η διαδικασία καύσης, όπου η φλόγα που παράγεται από την καύσιμη ύλη - η οποία μπορεί να περιλαμβάνει ποικιλία υλικών όπως σφαιρίδια ξύλου, κελύφη από ξηρούς καρπούς και άλλες μορφές βιομάζας - εισέρχεται στο κύκλωμα νερού του λέβητα.

Σε αυτό το σημείο, η θερμότητα που απελευθερώνεται από τη φλόγα μεταφέρεται στο νερό μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας, ο οποίος λειτουργεί για να αυξήσει τη θερμοκρασία του νερού. Αυτό το ζεστό νερό ή ατμός στη συνέχεια διοχετεύεται σε ένα δίκτυο θέρμανσης, παρέχοντας θέρμανση για τους χώρους ή και ζεστό νερό χρήσης.

Όσον αφορά την αποθήκευση της βιομάζας, αυτή πραγματοποιείται σε ειδικά σχεδιασμένα δοχεία ή σιλό, τα οποία εγγυώνται την ασφαλή και αποδοτική τροφοδοσία του καυστήρα με την κατάλληλη ποσότητα καυσίμου. Η απόδοση των λεβήτων βιομάζας μπορεί να φθάνει έως και το εντυπωσιακό 94%, κάτι που τους καθιστά εξαιρετικά αποδοτικούς και οικονομικά αποδοτικούς, με σημαντικά χαμηλότερες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου συγκριτικά με τους παραδοσιακούς λέβητες που λειτουργούν με ορυκτά καύσιμα.



Εικόνα 1.10 – Ενεργειακός λέβητας βιομάζας. (finotherm.gr, χ.χ.)



Εικόνα 1.11 – Ενδεικτική εικόνα εξαρτημάτων και λειτουργίας ενός αερολέβητα βιομάζας. (finotherm.gr, χ.χ.)

Κεφάλαιο 2 : Τύποι ξηραντήριων

2.1 Εισαγωγή

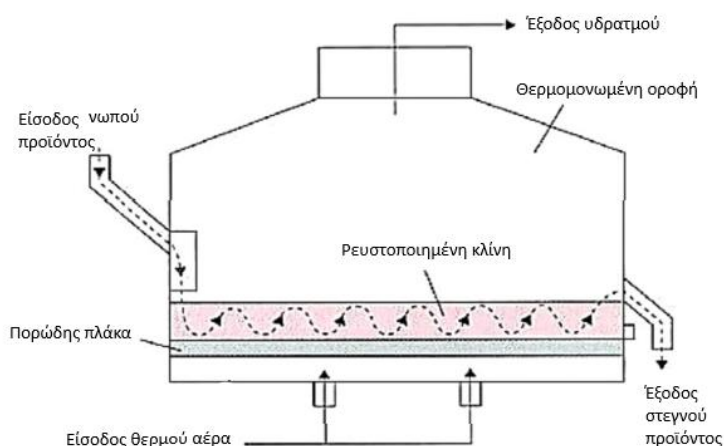
Η επιλογή του κατάλληλου τύπου ξηραντήριου εξαρτάται από την φυσική κατάσταση του προϊόντος πριν την ξήρανση και τα χαρακτηριστικά που επιδιώκονται στο τελικό προϊόν. Εν συνεχεία, θα περιγραφούν οι πιο διαδεδομένες διατάξεις ξηραντήριων που χρησιμοποιούνται για την ξήρανση αγροτικών προϊόντων.

2.2 Ξηραντήρια ρευστοποιημένης κλίνης

Η μέθοδος ξήρανσης με θερμό αέρα, η οποία απαντάται συχνά στη βιομηχανία, αποτελεί μία από τις πλέον αποτελεσματικές τεχνικές για την ταχεία αφυδάτωση διαφόρων υλικών. Στον θάλαμο ξήρανσης, ο θερμός αέρας περνά μέσα από το υλικό, προκαλώντας την αιώρησή του. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει ταχύτερους ρυθμούς ξήρανσης, επιφέροντας έτσι σημαντική οικονομία στον χρόνο και στην ενέργεια σε σχέση με άλλες τεχνικές. Είναι επίσης κατάλληλη για θερμικά ευαίσθητα προϊόντα, καθώς μειώνει τον κίνδυνο υπερθέρμανσης και διατηρεί την ποιότητα τους (Sivakumar et al., 2016).

Η αποδοτικότητα της μεθόδου εξαρτάται σημαντικά από την ικανότητα αιώρησης του νωπού προϊόντος, το οποίο πρέπει να έχει ειδικές διαστάσεις και βάρος. Η αιώρηση είναι κρίσιμη για την ομοιογενή ξήρανση και για την αποφυγή της συσσώρευσης υλικού. Σε αυτή την κατηγορία ξηραντήριων συμπεριλαμβάνονται επίσης οι εφαρμογές για βιομηχανικά και φαρμακευτικά προϊόντα, καθώς και για μια ποικιλία τροφίμων όπως σιτάρι και σόγια. Για προϊόντα μεγαλύτερου μεγέθους όπως αρακάς και ρεβίθια, έχουν αναπτυχθεί ειδικές κλίνες ξήρανσης που επιτρέπουν την αποτελεσματική αφυδάτωση χωρίς να απαιτείται ρευστοποίηση του προϊόντος.

Οι συνήθεις θερμοκρασίες λειτουργίας για τον θερμό αέρα κυμαίνονται από 60 έως 90 βαθμούς Κελσίου, ενώ οι χρόνοι ξήρανσης μπορούν να διαφέρουν από 30 λεπτά έως και 1,5 ώρες ανάλογα με το είδος του υλικού και τις επιθυμητές προδιαγραφές του τελικού προϊόντος (Μπελεσιώτης & Δεληγιάννη, 2009). Η σωστή διαχείριση αυτών των παραμέτρων είναι κρίσιμη για την επίτευξη της βέλτιστης ποιότητας και για τη μείωση του κινδύνου απώλειας θρεπτικών συστατικών ή της επιδείνωσης των οργανοληπτικών ιδιοτήτων του προϊόντος.



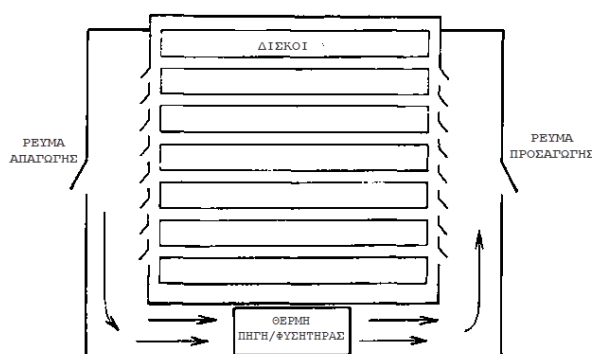
Εικόνα 2.1 - Τυπική διάταξη ξηραντήρα ρευστοποιημένης κλίνης. (Sivakumar, Saravanan, Perumal, & Iniyan, 2016)

2.3 Ξηραντήρια θαλάμων με δίσκους

Τα ξηραντήρια θαλάμων με δίσκους είναι συχνό φαινόμενο στη βιομηχανική κλίμακα λόγω της απλότητας της κατασκευής τους. Αυτά τα ξηραντήρια λειτουργούν απλώνοντας ομοιόμορφα το νωπό υλικό σε δίσκους που μοιάζουν με τελάρα, τοποθετημένους σε διάφορα επίπεδα μέσα σε έναν καλά μονωμένο θάλαμο ξήρανσης. Ο θερμαινόμενος αέρας ξήρανσης, που παράγεται από έναν θερμαντήρα, κυκλοφορεί στον θάλαμο με τη βοήθεια ενός φυσητήρα. Ένα τμήμα του αέρα αυτού ανακυκλώνεται μέσα στο θάλαμο, ενώ το

υπόλοιπο εκτονώνεται (βλ. εικόνα 2.2). Η θερμοκρασία, η υγρασία και η ροή του αέρα μπορούν να προσαρμοστούν στις ανάγκες του συγκεκριμένου προϊόντος που υπόκειται σε ξήρανση, ρυθμίζοντας την ροή του αέρα, τον ρυθμό ανακυκλοφορίας του και την ισχύ του θερμαντήρα. Συστήματα εκτροπής αέρα και μηχανισμοί κατανομής του αέρα κατά μήκος του θαλάμου είναι ενσωματωμένα για την ακριβή ρύθμιση της ανακυκλοφορίας και της ταχύτητας του αέρα. Για να εξασφαλιστεί ομοιόμορφη ξήρανση, απαιτείται σταθερή ροή αέρα σε όλους τους δίσκους, καθώς οποιαδήποτε ανισορροπία στη ροή μπορεί να οδηγήσει σε ανομοιόμορφη ξήρανση (Loesecke, 1955).

Τα ξηραντήρια θαλάμων με δίσκους κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τη διεύθυνση ροής του αέρα. Στα ξηραντήρια παράλληλης ροής, ο αέρας διέρχεται παράλληλα στα τελάρα, ενώ στα ξηραντήρια εγκάρσιας ροής, ο αέρας διασχίζει τα τελάρα κάθετα. Τα ξηραντήρια εγκάρσιας ροής, λόγω της διαμήκου επαφής του αέρα με το προϊόν, προσφέρουν συχνά μικρότερο κύκλο λειτουργίας και αυξημένη αποδοτικότητα ξήρανσης.



Εικόνα 2.2 - Τυπική διάταξη ξηραντήριου θαλάμου με δίσκους. (Διαμαντόπουλος, 2013)

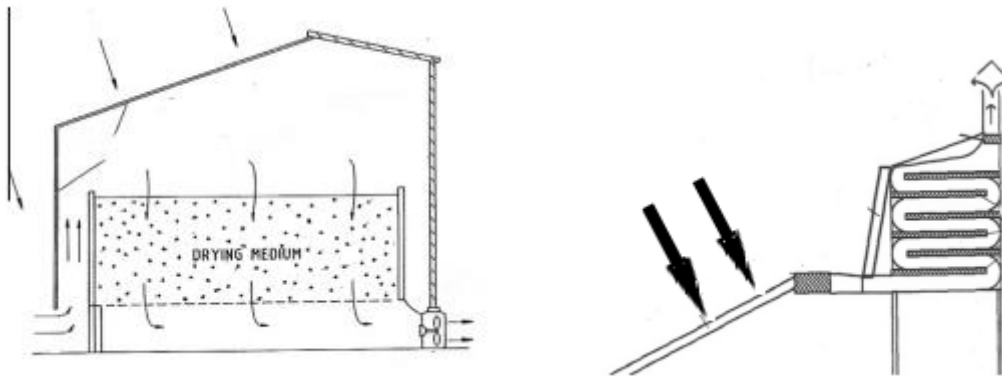
2.4 Ηλιακά ξηραντήρια

Τα ηλιακά ξηραντήρια αποτελούν μια δημοφιλή επιλογή σε περιοχές όπου η ηλιοφάνεια είναι έντονη και συχνή. Αυτά τα ξηραντήρια, που συνήθως είναι μικρής δυναμικότητας, λειτουργούν είτε με άμεση θέρμανση από την ηλιακή ακτινοβολία είτε με έμμεση θέρμανση μέσω ηλιακών συλλεκτών. Βασίζονται στην αρχή της ηλιακής ενέργειας για να επιτύχουν την αποξήρανση των προϊόντων, προσφέροντας μια βιώσιμη και οικονομικά αποδοτική λύση.

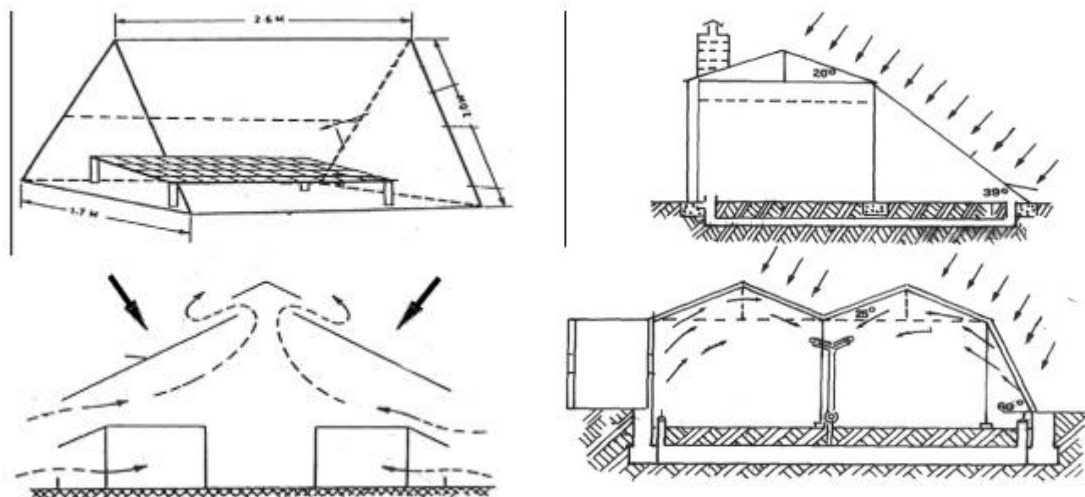
Ανάλογα με το σύστημα κυκλοφορίας του αέρα, τα ηλιακά ξηραντήρια κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες: αυτά με φυσική κυκλοφορία και εκείνα με εξαναγκασμένη κυκλοφορία. Τα

ξηραντήρια με φυσική κυκλοφορία στηρίζονται στη φυσική θερμοκρασιακή διαφορά για την κίνηση του αέρα, ενώ εκείνα με εξαναγκασμένη κυκλοφορία χρησιμοποιούν ανεμιστήρες για την βελτιστοποίηση της ροής του αέρα.

Η κατασκευή των ηλιακών ξηραντήριων δεν ακολουθεί μία στάνταρ διαδικασία ή σχέδιο. Συχνά σχεδιάζονται και κατασκευάζονται με βάση τις εμπειρίες και τις ανάγκες των παραγωγών, με κύριο στόχο την βελτίωση της ποιότητας του τελικού προϊόντος και την μείωση του χρόνου ξήρανσης, ιδιαίτερα για μικρές και μεσαίες παραγωγές (Μπελεσιώτης και Δεληγιάννη, 2009). Επιπρόσθετα, η ηλιακή ξήρανση είναι ιδιαίτερα προτιμητέα σε αγροτικές περιοχές όπου η πρόσβαση σε άλλες μορφές ενέργειας είναι περιορισμένη, καθώς προσφέρει μια ανεξάρτητη και ανανεώσιμη λύση για την ξήρανση των προϊόντων.



Εικόνα 2.3 - Δύο διαφορετικές διατάξεις ηλιακών ξηραντήριων εξαναγκασμένης ροής. (Belessiotis & Delyannis, 2011)

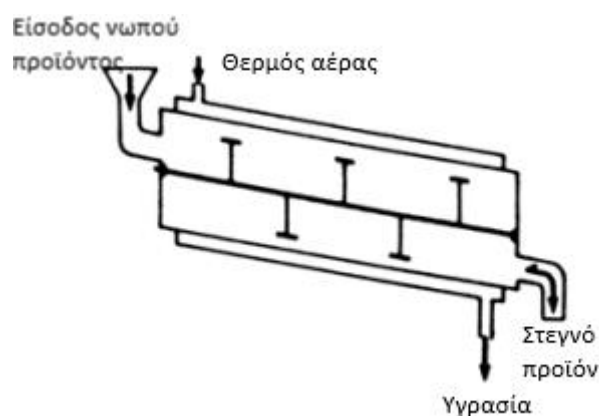


Εικόνα 2.4 - Δύο διαφορετικές διατάξεις ηλιακών ξηραντήριων φυσικής-παθητικής ροής. (Belessiotis & Delyannis, 2011)

2.5 Ξηραντήριο περιστροφικής κίνησης

Τα περιστρεφόμενα σωληνωτά ξηραντήρια είναι συσκευές που βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στη χημική και μεταλλουργική βιομηχανία, αλλά χρησιμοποιούνται επίσης και για την ξήρανση γεωργικών προϊόντων. Αυτό το είδος ξηραντήριου χαρακτηρίζεται από έναν περιστρεφόμενο σωληνωτό κύλινδρο ή τύμπανο, μέσα από τον οποίο διέρχεται θερμός αέρας, είτε κατά ομορροή είτε κατ' αντιρροή σε σχέση με την εισαγωγή του νωπού υλικού προς ξήρανση. Η εσωτερική επιφάνεια του κυλίνδρου είναι εφοδιασμένη με μεταλλικά πτερύγια σε διάφορες διατάξεις και γεωμετρίες, προκειμένου να αυξηθεί η επιφάνεια επαφής του στερεού υλικού με τον αέρα και να βελτιωθεί η κυκλοφορία και ανάμιξη του υλικού.

Η αποτελεσματικότητα αυτών των ξηραντήριων εξαρτάται από την ομοιόμορφη κατανομή του θερμού αέρα και την αποδοτική περιστροφή του τυμπάνου, εξασφαλίζοντας έτσι την ομοιόμορφη ξήρανση του υλικού. Η χρήση αυτών των ξηραντήριων είναι ιδανική για προϊόντα που απαιτούν αποτελεσματική απομάκρυνση υγρασίας, όπως στην περίπτωση βιομηχανικών υλικών ή πρώτων υλών γεωργικής προέλευσης. Η ρύθμιση της θερμοκρασίας και της ταχύτητας περιστροφής του τυμπάνου επιτρέπει την ευελιξία στη διαχείριση διαφόρων τύπων υλικών, προσφέροντας μια προσαρμοσμένη λύση ξήρανσης για κάθε συγκεκριμένη εφαρμογή.



Εικόνα 2.5 - Διάταξη περιστροφικού ξηραντήριου. (Unit operations in food processing)

2.6 Λυοφιλίωση

Η λυοφιλίωση, μια εξελιγμένη μέθοδος ξήρανσης, αφαιρεί το νερό από τα φυτικά υλικά μέσω της εξαχνώσεως. Η διαδικασία αυτή διεξάγεται κάτω από το τριπλό σημείο του νερού,

δηλαδή σε συνθήκες όπου η τάση ατμών και η θερμοκρασία παραμένουν χαμηλές, και γι' αυτό απαιτείται η χρήση αντλίας κενού.

Η λυοφιλίωση υλοποιείται σε τρία βασικά στάδια: α) την αρχική κατάψυξη του τροφίμου σε θερμοκρασίες περίπου -70°C , β) την πρωτογενή ξήρανση και γ) την δευτερογενή ξήρανση. Κατά την πρωτογενή ξήρανση, η πίεση μειώνεται στον θάλαμο ξήρανσης, κάτι που οδηγεί τον πάγο που έχει σχηματιστεί κατά την κατάψυξη σε εξάχνωση. Έπειτα, κατά την δευτερογενή ξήρανση, ρυθμίζεται η αντλία κενού στο μέγιστο για την αφαίρεση του δεσμευμένου νερού.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της λυοφιλίωσης είναι η διατήρηση του αρώματος, της γεύσης και των πτητικών ουσιών του προϊόντος, καθώς δεν επηρεάζονται σημαντικά σε σύγκριση με άλλες μεθόδους ξήρανσης. Ωστόσο, το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου είναι το υψηλό κόστος του απαιτούμενου μηχανολογικού εξοπλισμού και η σημαντική κατανάλωση ενέργειας. Αυτοί οι παράγοντες καθιστούν τη λυοφιλίωση κατάλληλη κυρίως για μεγάλες βιομηχανίες τροφίμων και φαρμακοβιομηχανίες, όπου οι απαιτήσεις για υψηλή ποιότητα και η ανάγκη διατήρησης ευαίσθητων συστατικών δικαιολογούν το επιπλέον κόστος. Η τεχνική αυτή είναι ιδανική για τη διατήρηση της δομικής ακεραιότητας και της θρεπτικής αξίας των προϊόντων, κάνοντάς την προτιμητέα σε εφαρμογές όπου αυτά τα κριτήρια είναι πρωταρχικής σημασίας. [Barresi et al., 2018]



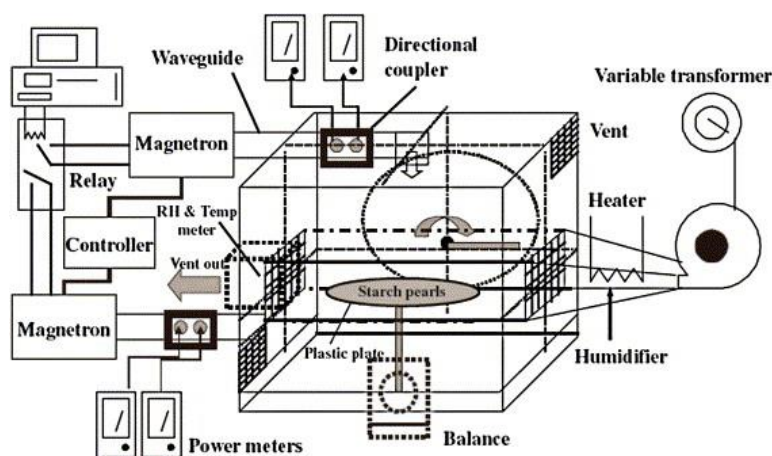
Εικόνα 2.6 - Λυοφιλωτές για ξήρανση αρωματικών και φαρμακευτικών φυτών. (Πολυσίου, 2008)

2.7 Ξηραντήρια μικροκυμάτων

Τα ξηραντήρια μικροκυμάτων είναι σύγχρονες συσκευές ξήρανσης που λειτουργούν με την αρχή της χρήσης μικροκυμάτων για την ταχεία αποξήρανση των νωπών προϊόντων εντός ενός θαλάμου. Παρόλο που η ξήρανση με μικροκύματα μπορεί να επιτύχει εντυπωσιακά ταχείς

ρυθμούς ξήρανσης, αντιμετωπίζει σημαντικά εμπόδια όπως την ανομοιόμορφη ξήρανση και την δυσκολία στον έλεγχο της θερμοκρασίας. Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων, συνήθως συνδυάζεται με άλλες τεχνικές ξήρανσης. (Zhang et al., 2006)

Η συνδυασμένη χρήση μικροκυμάτων με θερμό αέρα ή ως βοηθητική μέθοδος σε διαδικασίες όπως η λυοφιλίωση και η οσμωτική αφυδάτωση, αποτελεί παράδειγμα υβριδικών μεθόδων. Αυτές οι προσεγγίσεις στοχεύουν στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και του χρόνου ξήρανσης, βελτιώνοντας την ποιότητα του τελικού αποξηραμένου προϊόντος και προσφέροντας τη δυνατότητα ξήρανσης διαφόρων τύπων προϊόντων με μία μόνο διάταξη.



Εικόνα 2.7 - Τυπική διάταξη θερμού ξηραντήρα με μικροκυματική ξήρανση για το τελικό στάδιο. [Fu, Dai, Yang, 2005]

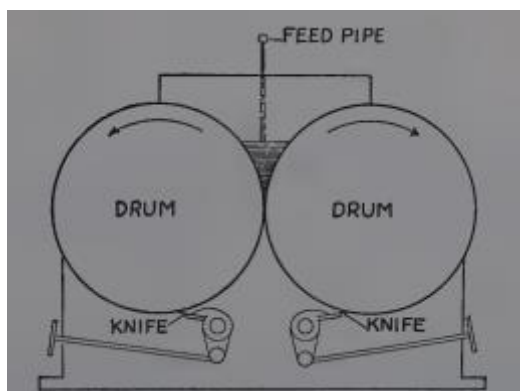
Πρόσθετα, η χρήση μικροκυμάτων στην ξήρανση επιτρέπει την άμεση ενεργοποίηση των μορίων νερού στο προϊόν, οδηγώντας σε πιο ομοιογενή και ελεγχόμενη διαδικασία. Αυτός ο τρόπος εφαρμογής καθιστά την μέθοδο ιδανική για προϊόντα που απαιτούν προσεκτική διαχείριση της υγρασίας και της θερμοκρασίας, όπως ευαίσθητα βιομηχανικά υλικά ή ποιοτικά τρόφιμα. Η ευελιξία των μικροκυμάτων και η δυνατότητά τους να ενσωματωθούν σε πολύπλοκες διαδικασίες ξήρανσης τα καθιστούν μια ισχυρή επιλογή για μοντέρνες βιομηχανικές εφαρμογές.

2.8 Ξηραντήρια Τυμπάνου

Αυτά μπορεί να είναι ατμοσφαιρικά ή κενού, αποτελούμενα από ατμοθερμαινόμενα τύμπανα διαμέτρου μισού έως δύο μέτρων στα οποία το υλικό που πρόκειται να ξηραθεί εφαρμόζεται με τη βοήθεια μηχανισμών τροφοδοσίας. Τα τύμπανα μπορεί να είναι μονά ή

διπλά. Τα τύμπανα περιστρέφονται και πριν ολοκληρώσουν μία πλήρη περιστροφή, το υλικό ξηραίνεται αρκετά ώστε να αφαιρεθεί με ένα 'νυστέρι', ή ξύστρα. Γενικά παρέχονται μεταφορικοί ιμάντες για να απομακρύνουν το ξηρό υλικό από την περιοχή του τυμπάνου. Το νωπό υλικό τροφοδοτείται στα τύμπανα με διάφορες διατάξεις: μπορεί να υπάρχει ένα σύστημα ψεκασμού που αποτελείται από έναν κύλινδρο υψηλής ταχύτητας που εκτοξεύει ένα σπρέι του νωπού υλικού στο θερμαινόμενο τύμπανο ή το υλικό μπορεί να τροφοδοτείται στα τύμπανα μέσω ενός τρυπημένου σωλήνα ή μέσω ενός θερμαινόμενου δοχείου εφοδιασμένου με αναδευτήρα και ρότορα. Η επιλογή της μεθόδου τροφοδοσίας εξαρτάται κυρίως από τον τύπο του υλικού που ξηραίνεται.

Τα ξηραντήρια τυμπάνου είναι κατάλληλα για την ξήρανση υλικών όπως το γάλα, ορισμένους χυμούς λαχανικών, πηκτίνη και μπανάνες. Επίσης χρησιμοποιούνται ως προκαταρκτικό ξηραντήριο για κρέας. Επιπλέον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ξήρανση λαχανικών που θα χρησιμοποιηθούν στην παρασκευή πούδρων. Δεν είναι κατάλληλα όταν είναι επιθυμητή η παραγωγή κάτι διαφορετικού από νιφάδες ή σκόνη. (Loesecke, 1955)



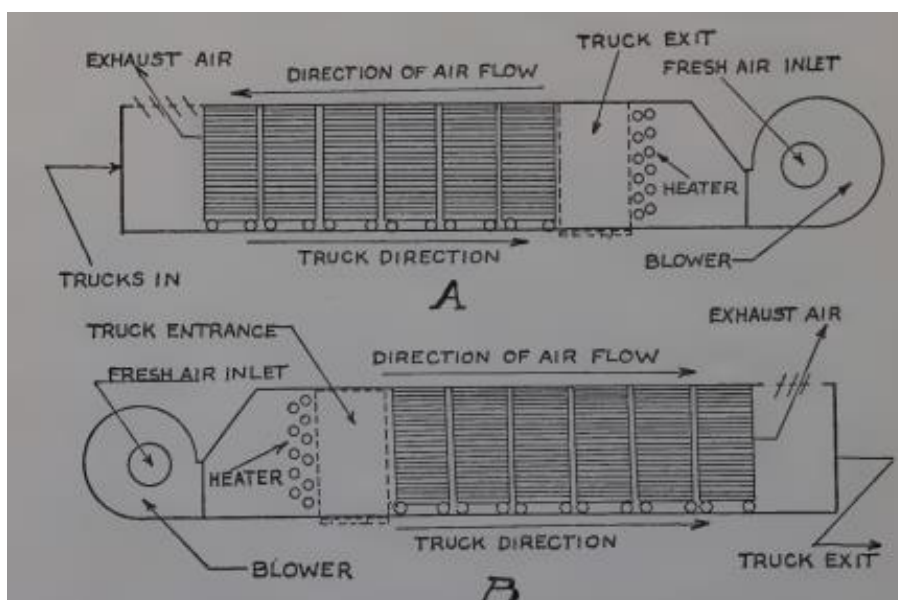
Εικόνα 2.8 - Ξηραντήρας διπλών τυμπάνων με κεντρική τροφοδοσία. (Loesecke, 1955)

2.9 Σήραγγες Ξήρανσης ή Ξήρανση τύπου τούνελ

Αυτός είναι ένας από τους τύπους ξήρανσης που χρησιμοποιούνται ευρέως για την αφυδάτωση φρούτων και λαχανικών. Με την πιο συνηθισμένη διάταξη, η ξήρανση πραγματοποιείται σε σήραγγες περίπου 10.7 ή 12.2 μέτρα μήκος ή περισσότερο και περίπου 1.8 μέτρα ύψος και 1.8 μέτρα πλάτος. Αυτές οι διαστάσεις δεν είναι στάνταρ, αλλά το μήκος της σήραγγας σπάνια υπερβαίνει τα 15.2 μέτρα. Το υλικό που θα ξηραθεί φορτώνεται σε διάτρητους δίσκους, συνήθως από ξύλο, οι οποίοι στοιβάζονται σε καρότσια. Οι ξύλινοι δίσκοι συχνά θρυμματίζονται και μολύνουν το προϊόν, και μερικοί παραγωγοί τροφίμων

χρησιμοποιούν μεταλλικούς δίσκους πιστεύοντας ότι το υψηλότερο κόστος επένδυσης αντισταθμίζεται περισσότερο από τη μακρύτερη διάρκεια ζωής του δίσκου και την εξάλειψη των θρυμμάτων από το προϊόν.

Οι σήραγγες μπορεί να χωρούν από 4 έως 20 καρότσια. Τα καρότσια και οι δίσκοι πρέπει να τοποθετούνται στριμωχτά μέσα στη σήραγγα, ώστε όλος ο αέρας να περνά μεταξύ και διαμέσου των δίσκων. Τα φορτωμένα καρότσια εισάγονται μέσω μιας πόρτας στο ένα άκρο ή πλευρά της σήραγγας, και τα καρότσια με το ξηρό υλικό αφαιρούνται από το αντίθετο άκρο. Η κίνηση του αέρα μέσα στη σήραγγα μπορεί να είναι στην ίδια κατεύθυνση με τα καρότσια (παράλληλη ροή), αντίθετη προς την κίνηση των καροτσιών ή ο αέρας μπορεί να κινείται μέσα από τα καρότσια διαγώνια προς τον άξονα της σήραγγας. Πολλές διαφορετικές παραλλαγές αυτών των τύπων έχουν χρησιμοποιηθεί για την εμπορική αφυδάτωση λαχανικών. (Loesecke, 1955)



Εικόνα 2.9 - Σήραγγα ξήρανσης με Α) αντίθετη ροή Β) παράλληλη ροή. (Loesecke, 1955)

Κεφάλαιο 3 : Μοντελοποίηση της διεργασίας της ξήρανσης

3.1 Εισαγωγή στη μοντελοποίηση της διεργασίας ξήρανσης

Στην προκείμενη ενότητα αναλύονται οι βασικές επιστημονικές μέθοδοι και προσεγγίσεις που αναφέρονται στην ειδική βιβλιογραφία σχετικά με τη μοντελοποίηση της διεργασίας ξήρανσης. Αυτές οι προσεγγίσεις αποσκοπούν στη διερεύνηση και κατανόηση των δυναμικών και των φυσικοχημικών μηχανισμών που διέπουν την ξήρανση.

3.2 Θεωρητική Προσέγγιση της Διεργασίας Ξήρανσης

Η διεργασία ξήρανσης περιγράφεται ως η αφαίρεση υγρασίας από ένα στερεό μέσο, είτε αυτό είναι φυσικό υλικό ή τροφικό προϊόν. Το επιτυχές αποτέλεσμα της ξήρανσης κρίνεται από την ποιότητα του τελικού προϊόντος, η οποία εξαρτάται από μια σειρά κρίσιμων παραμέτρων. Αυτές οι παράμετροι περιλαμβάνουν τον ρυθμό απώλειας υγρασίας, την ομοιομορφία της αποξήρανσης, την διατήρηση των θρεπτικών ιδιοτήτων και της οργανοληπτικής ποιότητας, καθώς και την ενεργειακή αποδοτικότητα της διεργασίας. Στην ενότητα αυτή, θα εξεταστούν εκτενώς οι μέθοδοι ποιοτικής αξιολόγησης και θα αναλυθεί η συμπεριφορά του στερεού μέσου κατά τη διεργασία ξήρανσης, εστιάζοντας στις κρίσιμες παραμέτρους που προσδιορίζουν την αποδοτικότητα και την ποιότητα του τελικού προϊόντος.

3.3 Ισόθερμες καμπύλες ρόφησης

3.3.1 Δραστικότητα της υγρασίας

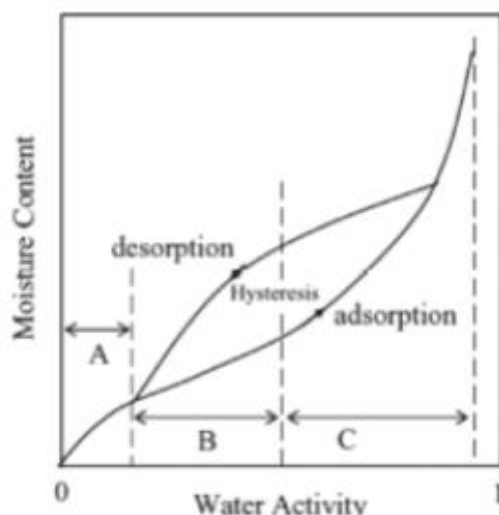
Η παρούσα ενότητα αποτελεί μια συνοπτική εξέταση των βασικών επιστημονικών μεθόδων που αφορούν τη μοντελοποίηση των ισόθερμων καμπυλών ρόφησης. Αυτές οι καμπύλες παρέχουν ένα κρίσιμο εργαλείο για την κατανόηση της δυναμικής αλληλεπίδρασης μεταξύ υγρασίας και στερεών υλικών, καθώς και των φυσικών μηχανισμών που διέπουν την ξήρανση.

Η διεργασία ξήρανσης αναλύεται ως μια διαδικασία απομάκρυνσης υγρασίας από στερεά υλικά. Η ισορροπία υγρασίας μεταξύ του υλικού και του περιβάλλοντος αέρα επιτυγχάνεται όταν η πίεση των υδρατμών πάνω στην επιφάνεια του υλικού εξισώνεται με τη μερική πίεση των υδρατμών του αέρα για μια συγκεκριμένη θερμοκρασία.

Οι ισόθερμες καμπύλες ρόφησης σχηματίζονται μέσω της παρουσίας της σχέσης μεταξύ της υγρασίας ενός υλικού X και της σχετικής υγρασίας του περιβάλλοντος αέρα Φ για δεδομένη θερμοκρασία. Στον τομέα των τροφίμων, αυτές οι καμπύλες σχετίζουν την υγρασία των τροφίμων με την δραστικότητα του νερού (a_w), ορισμένη ως το λόγο της μερικής πίεσης των υδρατμών του νερού στο τρόφιμο p προς τη μερική πίεση του απιονισμένου νερού p_0 , στην ίδια θερμοκρασία και ισούται με την σχετική υγρασία του αέρα ξήρανσης, διαιρεμένη δια 100, στο σημείο ισορροπίας [Labuza & T.P., 1968].

Η δραστικότητα του νερού συνδέεται άμεσα με τη χημική και μικροβιακή σταθερότητα των τροφίμων, καθώς και με τις αλλαγές στην υφή και άλλες οργανοληπτικές ιδιότητες. Η κατανόηση των ισόθερμων καμπυλών επιτρέπει τον προσδιορισμό της βέλτιστης συνθήκης ξήρανσης για τη διατήρηση της ποιότητας των τροφίμων και την επίτευξη των επιθυμητών υγρασιακών συνθηκών για ασφαλή αποθήκευση [Sablani et al., 2007].

Επιπλέον, οι ισόθερμες καμπύλες προσφέρουν πολύτιμη πληροφορία για τον προσδιορισμό της ενεργειακής αποδοτικότητας της διεργασίας ξήρανσης και της σχετικής απόδοσης στην αφυδάτωση των τροφίμων. Οι πληροφορίες που παρέχονται από αυτές τις καμπύλες είναι κρίσιμες για την ανάπτυξη καινοτόμων μεθόδων συντήρησης τροφίμων, βελτιστοποιώντας τη διατήρηση των θρεπτικών συστατικών και της οργανοληπτικής ποιότητας.



Εικόνα 3.1 - Ισόθερμη καμπύλη ρόφησης για ένα τυπικό τρόφιμο, όπου παρουσιάζεται η υστέρηση μεταξύ προσρόφησης και εκρόφησης. [ANDRADE, M., C., 2011]

3.3.2 Μαθηματικά μοντέλα για τις ισόθερμες καμπύλες ρόφησης

Στο πεδίο της επιστήμης τροφίμων, η αναπαράσταση των ισοθερμικών καμπυλών των υλικών των τροφίμων αποτελεί έναν σύνθετο και πολυδιάστατο ερευνητικό τομέα. Υπάρχει μια πληθώρα μαθηματικών μοντέλων, τόσο θεωρητικών όσο και εμπειρικών, που επιχειρούν να αποτυπώσουν τον τρόπο μεταβολής της δραστηριότητας του νερού στα υλικά των τροφίμων. Ωστόσο, δεν υπάρχει κάποια ενιαία εξίσωση ή μοντέλο που να παρέχει ακριβή αποτελέσματα για όλες τις κατηγορίες τροφίμων, λόγω της μεγάλης ποικιλίας των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων των τροφίμων (Al-Muhtaseb et al., 2002).

Van den Berg και Bruin [Berg & Bruin, 1981] ανέλυσαν και ταξινόμησαν 77 από τα πιο σημαντικά μοντέλα σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- Θεωρητικά Μοντέλα (48): Αυτά τα μοντέλα βασίζονται σε αυστηρές φυσικοχημικές αρχές και θεωρίες, επιδιώκοντας να προσφέρουν μια βαθιά κατανόηση των θεμελιωδών μηχανισμών που διέπουν τη δραστηριότητα του νερού στα υλικά τροφίμων.
- Πρακτικά Θεωρητικά Μοντέλα (15): Πρόκειται για μοντέλα που ενσωματώνουν στοιχεία από την θεωρία, αλλά προσαρμόζονται για να αντικατοπτρίζουν πιο πρακτικές και εφαρμοσμένες πτυχές της ξήρανσης τροφίμων, όπως είναι οι συνθήκες επεξεργασίας και οι διατροφικές ιδιότητες.
- Εμπειρικά Μοντέλα (14): Αυτά τα μοντέλα είναι βασισμένα κυρίως σε πειραματικά δεδομένα και εμπειρικές παρατηρήσεις. Ενώ δεν προσφέρουν την ίδια θεωρητική βάση όπως τα θεωρητικά μοντέλα, είναι πολύτιμα για την εφαρμογή σε συγκεκριμένες περιπτώσεις και για την προσαρμογή σε συγκεκριμένα τύπους τροφίμων.

Η σημασία της ταξινόμησης αυτής έγκειται στην παροχή ενός σαφούς πλαισίου για την επιλογή του κατάλληλου μοντέλου ανάλογα με τις ειδικές ανάγκες και τις παραμέτρους της ξήρανσης. Η επιλογή του σωστού μοντέλου είναι κρίσιμη για την ακριβή πρόβλεψη και βελτιστοποίηση των διαδικασιών ξήρανσης στην βιομηχανία τροφίμων, επιδιώκοντας την βέλτιστη διατήρηση της ποιότητας και της διατροφικής αξίας των τροφίμων.

Μεταξύ των διαφόρων θεωρητικών μοντέλων για την περιγραφή της δραστηριότητας του νερού στα υλικά των τροφίμων, η συνάρτηση Langmuir ξεχωρίζει λόγω της ειδικής εστίασής της στις δυνάμεις αλληλεπίδρασης μεταξύ της επιφάνειας του προϊόντος και του νερού. Αυτή

η συνάρτηση ενσωματώνει την έννοια του νερού που προσροφάται ως μονομοριακό στρώμα από την επιφάνεια του τρόφιμου, με βάση τις αλληλεπιδράσεις συμπύκνωσης ατμού.

Η συνάρτηση Langmuir ακολουθεί τη μαθηματική μορφή:

$$a_w(1/X_e - 1/X_m) = 1/C \quad (3.1)$$

όπου X_e είναι η ποσότητα νερού στο τρόφιμο που μειώνεται μέχρι να φτάσει σε κατάσταση ισορροπίας (kg νερού/kg ξηρής ουσίας), X_m είναι το περιεχόμενο νερού του μονομοριακού στρώματος (kg νερού/kg ξηρής ουσίας), όπου οι δεσμοί νερού είναι ιδιαίτερα ισχυροί, a_w είναι η δραστικότητα υγρασίας και C είναι μια σταθερά [ANDRADE et al., 2011].

Η συνάρτηση Langmuir παρέχει μια σημαντική θεωρητική βάση για την κατανόηση των διαδικασιών προσρόφησης και απορρόφησης υγρασίας στα τρόφιμα. Η ανάλυση μέσω αυτής της συνάρτησης επιτρέπει στους επιστήμονες και τεχνολόγους τροφίμων να προβλέψουν και να κατανοήσουν την επίδραση της υγρασίας στην σταθερότητα, την ασφάλεια και την ποιότητα των τροφίμων. Η συνάρτηση αυτή είναι επίσης χρήσιμη για την ανάπτυξη μοντέλων που προβλέπουν τη συμπεριφορά των τροφίμων κατά τη διάρκεια διαδικασιών όπως η ξήρανση, η αποθήκευση και η συσκευασία.

Επιπρόσθετα, η εφαρμογή της συνάρτησης Langmuir συμβάλλει στην ανάπτυξη τεχνικών για την βελτιστοποίηση της διατήρησης των τροφίμων, μειώνοντας την απώλεια θρεπτικών συστατικών και διατηρώντας τις οργανοληπτικές τους ιδιότητες. Τέλος, η κατανόηση των δυνάμεων που διέπουν την προσρόφηση και την απορρόφηση υγρασίας μέσω της συνάρτησης Langmuir είναι καθοριστική για την επιστημονική κοινότητα στην ανάπτυξη νέων και πιο αποδοτικών τεχνολογιών στην επιστήμη τροφίμων.

Στον τομέα της επιστήμης τροφίμων και της μελέτης της υγρασίας και των ιδιοτήτων της, τα μοντέλα Brunauer, Emmett και Teller (BET) και Guggenheim, Anderson και De Boer (GAB) αντιπροσωπεύουν σημαντικές επεκτάσεις της βασικής συνάρτησης Langmuir. Ενώ η συνάρτηση Langmuir εστιάζεται στην προσρόφηση υγρασίας ως μονομοριακό στρώμα, τα μοντέλα BET και GAB προχωρούν πέρα από αυτή την προσέγγιση, εισάγοντας την έννοια των πολυμοριακών στρωμάτων [Blahovec & Yanniotis, 2009]. Τα μοντέλα αυτά είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των τροφίμων κατά την αποθήκευση και την επεξεργασία. Η εφαρμογή τους βοηθά στη βελτίωση των διαδικασιών συντήρησης των τροφίμων, εξασφαλίζοντας την ποιότητα και την ασφάλεια των τελικών προϊόντων. Επίσης, δίνουν σημαντικές πληροφορίες για την ανάπτυξη νέων υλικών

συσκευασίας και τεχνικών επεξεργασίας που λαμβάνουν υπόψη την περιεκτικότητα σε υγρασία των τροφίμων.

Αναλυτικότερα:

- Μοντέλο BET: Πολυστρωματική Προσρόφηση

Το μοντέλο BET αναλύει την προσρόφηση υγρασίας στα υλικά τροφίμων ως μια διαδικασία πολυστρωματικής προσρόφησης. Αυτό σημαίνει ότι μετά τη σχηματισμό του πρώτου μονομοριακού στρώματος, επιπρόσθετα στρώματα νερού μπορούν να σχηματιστούν επάνω από αυτό. Το μοντέλο αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την περιγραφή της υγρασίας σε υλικά με πορώδη δομή, όπως τα τρόφιμα (Martin-Santos et al., 2012).

Η εξίσωση BET (Brunauer – Emmet – Teller), η οποία προσεγγίζει την ισόθερμη ρόφησης πολυστρωματικά, υπολογίζει την ποσότητα νερού που προσδένεται σε συγκεκριμένα πολικά και αφυδατωμένα συστήματα και έχει τις μορφές (2) ή (3):

$$X_e = \frac{X_m C a_w}{(1-a_w)[1+(C-1)a_w]} \quad (3.2)$$

$$\frac{a_w}{X_e(1-a_w)} = \frac{1}{X_m C} + \frac{C-1}{X_m C} a_w \quad (3.3)$$

Η ποσότητα νερού στο μονομοριακό στρώμα αποτελεί μια κρίσιμη παράμετρο για την κατανόηση των ιδιοτήτων της υγρασίας των τροφίμων. Αυτή η ποσότητα νερού αναφέρεται στο νερό που έχει απορροφηθεί από τα πολικά μόρια και τα ιόντα του υλικού, και παρουσιάζει συμπεριφορά παρόμοια με αυτήν που εμφανίζεται στην υγρή φάση.

Το μοντέλο Brunauer, Emmett και Teller (BET) είναι ένα από τα κυριότερα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της ποσότητας νερού στο μονομοριακό στρώμα. Η εξίσωση BET χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των ιδανικών συνθηκών υγρασίας, ειδικά σε περιπτώσεις αφυδατωμένων τροφίμων, όπου η διατήρηση της σταθερότητας και της ποιότητας είναι ζωτικής σημασίας (ANDRADE et al., 2011).

Στην πρακτική εφαρμογή, το μοντέλο BET αποδεικνύεται ως ένα απαραίτητο εργαλείο για την βιομηχανία τροφίμων, όπου ο προσδιορισμός της σωστής υγρασίας είναι κρίσιμος για

την επίτευξη της μέγιστης διατηρησιμότητας και της αποφυγής της μικροβιολογικής ανάπτυξης. Η εξίσωση BET επιτρέπει τον ακριβή και αναλυτικό υπολογισμό της ποσότητας νερού που μπορεί να δεθεί στα στερεά συστατικά των τροφίμων, παρέχοντας έτσι οδηγίες για την βέλτιστη επεξεργασία και αποθήκευση.

- Μοντέλο GAB: Εξειδικευμένη Προσέγγιση για Βιολογικά Υλικά

Από την άλλη πλευρά, το μοντέλο GAB αποτελεί μια πιο εξειδικευμένη προσέγγιση για την περιγραφή των ισοθερμικών καμπυλών σε βιολογικής προέλευσης υλικά. Με την εφαρμογή του μοντέλου GAB, είναι δυνατόν να αποτυπωθεί η συμπεριφορά της υγρασίας σε μια ευρύτερη κλίμακα συνθηκών, καταφέροντας να παρέχει μια πιο πλήρη εικόνα της περιεκτικότητας σε υγρασία των τροφίμων και έχει την εξής μορφή:

$$X_e = \frac{X_m C K a_w}{(1 - K a_w)[1 - K a_w + C K a_w]} \quad (3.4)$$

Όπου K, C σταθερές που σχετίζονται με την επίδραση της θερμοκρασίας. Με $C = c_o \exp(H_o - H_n / RT)$ και $K = k_o \exp(H_n - H_i / RT)$, όπου c_o , k_o είναι οι παράγοντες εντροπίας και H_o , H_n και H_i αντίστοιχα οι μοριακές ενθαλπίες ρόφησης του μονομοριακού στρώματος, των πολυστρωματικών στοιβάδων που βρίσκονται πάνω από το προηγούμενο και τέλος η ενθαλπία του υγρού. R είναι η παγκόσμια σταθερά των αερίων και T η απόλυτη θερμοκρασία.

Το μοντέλο GAB (Guggenheim, Anderson και De Boer) είναι μια προηγμένη μαθηματική δομή για την ανάλυση της προσρόφησης υγρασίας στα υλικά, ειδικά στα τρόφιμα. Αυτό το μοντέλο θεωρεί ότι τα μόρια του δεύτερου στρώματος προσρόφησης έχουν ιδιότητες παρόμοιες με εκείνες των ανώτερων στρωμάτων, αλλά εμφανίζουν διακριτή συμπεριφορά σε σχέση με τα μόρια σε υγρή κατάσταση.

Στο μοντέλο GAB, διακρίνεται ένα δεύτερο στάδιο προσρόφησης, όπου τα μόρια της προσροφούσας ουσίας εκδηλώνουν αλλαγμένες ιδιότητες, αναδεικνύοντας την ικανότητα του υλικού ως αποτελεσματικού προσροφητή. Εισάγεται η σταθερά K, η οποία υπολογίζει τη διαφορά του χημικού δυναμικού μεταξύ των μορίων που βρίσκονται στο δεύτερο στάδιο προσρόφησης και εκείνων σε υγρή κατάσταση.

Η σταθερά K στο μοντέλο GAB παρέχει μια μετρική για την ερμηνεία της διαφοράς στην ενεργειακή κατάσταση των μορίων προσρόφησης μεταξύ των διάφορων στρωμάτων. Όταν η τιμή της σταθεράς K είναι ίση με 1, το μοντέλο GAB συμπίπτει με το μοντέλο BET, προσφέροντας μια ομοιόμορφη προσέγγιση στην προσρόφηση του πρώτου μονομοριακού στρώματος.

Τέλος, Ενώ η εξίσωση GAB (Guggenheim, Anderson και De Boer) παρέχει μια θεωρητική βάση για την ανάλυση της υγρασιοδυναμικής στα τρόφιμα, βασιζόμενη στη θεωρία του Langmuir και στον νόμο του Raoult, υπάρχουν και άλλες εξισώσεις που είναι επίσης σημαντικές στον τομέα της τροφίμοεπιστήμης, παρόλο που είναι κυρίως εμπειρικές.

Μεταξύ αυτών, οι εξισώσεις που προτάθηκαν από τους Oswin, Peleg, και Smith αναδεικνύονται για την ευρεία χρήση τους στην ανάλυση της συμπεριφοράς της υγρασίας στα τρόφιμα. Παρόλο που αυτές οι εξισώσεις είναι εμπειρικές, δηλαδή βασίζονται στην παρατήρηση και την πειραματική διαδικασία, συχνά προσφέρουν ακριβέστερη προσαρμογή στα πειραματικά δεδομένα σε σύγκριση με την εξίσωση GAB [ANDRADE, et al., 2011]. Οι μορφές των οποίων παρατίθενται παρακάτω:

$$\text{Oswin} : X_e = A \left(\frac{a_w}{1-a_w} \right)^B \quad (3.5)$$

$$\text{Peleg} : X_e = K_1 a_w^{n_1} + K_2 a_w^{n_2} \quad (3.6)$$

$$\text{Smith} : X_e = K_1 + K_2 \ln(1 - a_w) \quad (3.7)$$

Παρακάτω θα δοθεί ένας πίνακας με συγκεντρωμένες τις μαθηματικές εκφράσεις που παρουσιάστηκαν στην συγκεκριμένη υποενότητα.

Όνομα μοντέλου	Μαθηματική έκφραση
BET	$X_e = \frac{X_m C a_w}{(1 - a_w)[1 + (C - 1)a_w]}$
GAB	$X_e = \frac{X_m C K a_w}{(1 - K a_w)[1 - K a_w + C K a_w]}$
Oswin	$X_e = A \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^B$
Peleg	$X_e = K_1 a_w^{n_1} + K_2 a_w^{n_2}$
Smith	$X_e = K_1 + K_2 \ln(1 - a_w)$

Πίνακας 3.1 - Μοντέλα και οι μαθηματικές τους εκφράσεις για την μοντελοποίηση των ισόθερμων καμπύλων απορρόφησης-εκρόφησης υγροσκοπικών υλικών.

3.4 Φάσεις της ξήρανσης

Η κατανόηση της διεργασίας ξήρανσης, δηλαδή των φυσικοχημικών φαινομένων που διέπουν την αφαίρεση υγρασίας από ένα νωπό προϊόν, απαιτεί μια εκτενή εξέταση της συμπεριφοράς του υλικού κατά τη διάρκεια της ξήρανσης υπό διαφορετικές συνθήκες. Στην πραγματικότητα, η διαδικασία ξήρανσης εμπεριέχει πολλαπλά στάδια ή φάσεις, με κάθε στάδιο να αποκαλύπτει διαφορετικές πτυχές της αλληλεπίδρασης του υλικού με το περιβάλλον της ξήρανσης.

Σύμφωνα με τους (Μπελεσιώτης & Δεληγιάννη, 2009), η ξήρανση μπορεί να διαχωριστεί σε τρία κύρια στάδια ή φάσεις, οι οποίες έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην αποδοτικότητα και στην ποιότητα του τελικού προϊόντος.

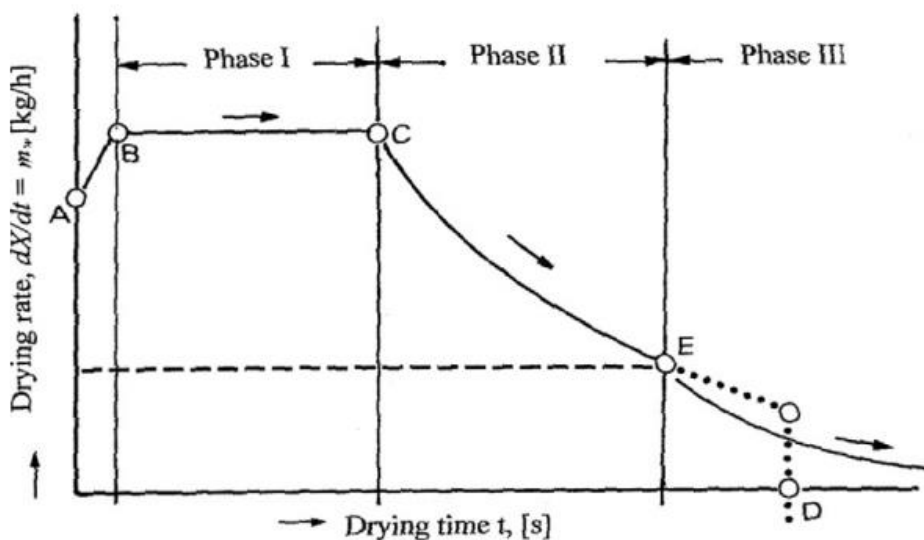
Φάση I - Σταθερού Ρυθμού Ξήρανσης: Κατά την αρχική φάση, η επιφάνεια του υλικού παραμένει κορεσμένη με υγρασία. Η υγρασία διαφεύγει από το υλικό με σταθερό ρυθμό λόγω της αδιάλειπτης ροής νερού από το εσωτερικό προς την επιφάνεια.

Φάση II - Φθίνοντος Ρυθμού Ξήρανσης: Σε αυτή τη φάση, η επιφάνεια του υλικού γίνεται ακόρεστη σε υγρασία. Η ποσότητα του νερού που μετακινείται προς την επιφάνεια μειώνεται σταδιακά, πράγμα που οδηγεί σε μείωση του ρυθμού ξήρανσης.

Φάση III - Τελικού Σταδίου Ξήρανσης: Στο τελικό στάδιο, ο ρυθμός ξήρανσης μειώνεται περαιτέρω και σταδιακά συγκλίνει προς την τιμή της υγρασίας ισορροπίας, δηλαδή την υγρασία που το υλικό θα έχει όταν είναι σε ισορροπία με τις δεδομένες συνθήκες του περιβάλλοντος.

Η ενδελεχής κατανόηση και ανάλυση αυτών των τριών φάσεων επιτρέπει την βελτιστοποίηση της διαδικασίας ξήρανσης, εστιάζοντας στην επιδίωξη του βέλτιστου ρυθμού ξήρανσης και της μέγιστης διατήρησης της ποιότητας του προϊόντος. Επιπρόσθετα, η διαχείριση της υγρασίας κατά τη διάρκεια της ξήρανσης επηρεάζει σημαντικά την οργανοληπτική ποιότητα, την διατηρησιμότητα και την ασφάλεια των τροφίμων, καθιστώντας την ενδελεχή μελέτη των ισόθερμων καμπυλών ρόφησης αναγκαία για την εφαρμογή αποδοτικών μεθόδων ξήρανσης.

Για τον ακριβή και αποδοτικό υπολογισμό της διάρκειας της ξήρανσης, είναι ζωτικής σημασίας η κατανόηση της δυναμικής του ρυθμού ξήρανσης. Αυτό συμπεριλαμβάνει την αναγνώριση και την κατανόηση των διαφόρων φάσεων που εμφανίζονται κατά τη διεργασία. Ο ρυθμός ξήρανσης αποτελεί έναν πολύτιμο δείκτη της συμπεριφοράς του υλικού κατά τη διάρκεια της ξήρανσης και είναι καθοριστικός για την επιλογή των μοντέλων που θα χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της εξέλιξης της υγρασίας στο υλικό κατά τη διάρκεια της διεργασίας, καθώς και για τον υπολογισμό του συνολικού χρόνου που απαιτείται για την ολοκλήρωσή της.



Σχήμα 3.2 - Μεταβολή του ρυθμού ξήρανσης σε σχέση με το χρόνο και οι αντίστοιχες φάσεις ξήρανσης (Μπελεσιώτης & Δεληγιάννη, 2009)

3.5 Μοντέλα προσδιορισμού της κινητικής της ξήρανσης

3.5.1 Εισαγωγή

Η ξήρανση λεπτού στρώματος, γνωστή στην αγγλική ορολογία ως "thin layer drying", αποτελεί μια κρίσιμη διαδικασία στην επεξεργασία τροφίμων και γεωργικών προϊόντων. Αυτή η τεχνική συνίσταται στην τοποθέτηση του νωπού προϊόντος σε λεπτά στρώματα, με στόχο τη μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας της μεταφοράς μάζας και θερμότητας μεταξύ του υλικού και του μέσου θερμοπρόσδοσης.

Η κινητική της ξήρανσης αναφέρεται στη δυναμική μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας του υλικού κατά τη διάρκεια της ξήρανσης. Αυτή η δυναμική μεταβολή περιγράφεται αναλυτικά μέσω διαφόρων μοντέλων ξήρανσης, τα οποία είναι κατασκευασμένα βάσει των συνθηκών ξήρανσης και των διαφορετικών φυσικών ιδιοτήτων των υλικών. Τα μοντέλα αυτά προσδιορίζονται και επαληθεύονται μέσω πειραματικών δεδομένων.

Στη δεύτερη φάση ξήρανσης, η οποία είναι κρίσιμη για την πλειονότητα των γεωργικών προϊόντων, τα χρησιμοποιούμενα μοντέλα χωρίζονται κυρίως σε δύο κατηγορίες: τα ημιεμπειρικά και τα μοντέλα διάχυσης. Τα ημιεμπειρικά μοντέλα επιλέγονται λόγω της ευκολίας υπολογισμού τους και της ευελιξίας που παρέχουν στην προσαρμογή τους σε διάφορες συνθήκες ξήρανσης, ενώ τα μοντέλα διάχυσης προτιμώνται για τη φυσική ερμηνεία των διεργασιών που παρέχουν.

Αυτά τα μοντέλα χρησιμοποιούνται ευρέως για την εκτίμηση της επίδρασης των παραμέτρων λειτουργίας των ξηραντηρίων. Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου εξαρτάται από τη φύση του υλικού, τις συνθήκες ξήρανσης και τις συγκεκριμένες απαιτήσεις της διεργασίας. Η συνεχής βελτίωση των μοντέλων και η ανάπτυξη νέων τεχνικών στον τομέα της ξήρανσης παρέχει σημαντικές ευκαιρίες για βελτίωση της αποδοτικότητας και της ποιότητας της διαδικασίας, καθώς και για την ανάπτυξη πιο βιώσιμων μεθόδων επεξεργασίας τροφίμων.

3.5.2 Μοντέλα μοριακής διάχυσης

3.5.2.1 Παραδοχές

Στην επιστήμη της ξήρανσης, ειδικά στην κατηγορία της ξήρανσης λεπτού στρώματος, ο δεύτερος νόμος του Fick αποτελεί ένα θεμελιώδη μηχανισμό για την περιγραφή της διάχυσης υγρασίας. Η εφαρμογή αυτού του νόμου προϋποθέτει την κατανόηση της γεωμετρίας του νωπού προϊόντος και της διαδικασίας τοποθέτησής του σε λεπτό στρώμα, επηρεάζοντας έτσι τη μορφή της διαφορικής εξίσωσης. Κατά την εφαρμογή αυτού του μοντέλου, γίνονται ορισμένες κρίσιμες παραδοχές για την απλοποίηση και την ακρίβεια των προβλέψεων [Cranck & J., 1975]:

- 1 Ομοιόμορφη Κατανομή Υγρασίας: Αρχικά, η υγρασία είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη στη μάζα του προϊόντος, επιτρέποντας την ομοιόμορφη ξήρανση.
- 2 Συμμετρία στην Μεταφορά Μάζας: Η μεταφορά μάζας πραγματοποιείται συμμετρικά σε σχέση με τον άξονα συμμετρίας της γεωμετρίας του λεπτού στρώματος ή του προϊόντος.
- 3 Άμεση Επίτευξη Υγρασίας Ισορροπίας: Κατά την έναρξη της ξήρανσης, η επιφανειακή υγρασία του προϊόντος φτάνει αμέσως στο επίπεδο της υγρασίας ισορροπίας.
- 4 Αμελητέα Αντίσταση Επιφανείας: Η αντίσταση της επιφάνειας στη μεταφορά μάζας είναι αμελητέα συγκριτικά με την εσωτερική αντίσταση του υλικού.
- 5 Διάχυση ως Μηχανισμός Μεταφοράς Μάζας: Η μεταφορά μάζας πραγματοποιείται μέσω διάχυσης.
- 6 Σταθερός Συντελεστής Διάχυσης: Ο συντελεστής διάχυσης παραμένει σταθερός για τις δεδομένες συνθήκες ξήρανσης, και η συρρίκνωση του προϊόντος είναι αμελητέα.

Η κατανόηση και η σωστή εφαρμογή αυτών των παραδοχών είναι κρίσιμη για την ανάπτυξη αποτελεσματικών και ακριβών μοντέλων ξήρανσης. Ενώ αυτά τα μοντέλα παρέχουν

πολύτιμη επιστημονική γνώση για την ανάλυση της διαδικασίας, παραμένουν προκλήσεις στην εφαρμογή τους, όπως η δυσκολία στον ακριβή προσδιορισμό των συντελεστών διάχυσης και η ανάγκη για ακριβή πειραματικά δεδομένα.

3.5.2.2 Πλάκα απείρου μήκους

Στο πλαίσιο της μελέτης της ξήρανσης γεωργικών προϊόντων, η εφαρμογή του νόμου του Fick για τη διάχυση σε ένα τρισδιάστατο σώμα, όπως μια πλάκα νωπού προϊόντος, προσφέρει σημαντικές επιστημονικές πληροφορίες. Ας υποθέσουμε ότι έχουμε μια πλάκα προϊόντος πάχους $2L$, η οποία υπόκειται σε ξήρανση με σταθερές συνθήκες αέρα ξήρανσης. Η αρχική υγρασία X_0 της πλάκας είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη στη μάζα της. Η διεργασία της ξήρανσης, την οποία υπόκεινται αυτά τα γεωργικά προϊόντα υπό αυτές τις συνθήκες, δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{ef} \frac{\partial X}{\partial z} \right) \quad (3.8)$$

Με τις ακόλουθες αρχικές και συνοριακές συνθήκες:

- 1 Ομοιόμορφη αρχική υγρασία: $X(z / 0) = X_0$
- 2 Περιεκτικότητα υγρασίας στην επιφάνεια ίση με την υγρασία ισορροπίας: $X(z, t) = X(L, t) = X_e$

Αντίστοιχα η μέση περιεχόμενη υγρασία ανά χρονική στιγμή δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\bar{X} = \frac{1}{L} \int_0^L X(z, t) dz \quad (3.9)$$

Σύμφωνα με τον (Cranck & J., 1975), εισάγοντας τον αδιάστατο μέσο λόγο υγρασίας για τις προαναφερθείσες αρχικές οριακές συνθήκες, η εξίσωση 8 μετατρέπεται ως εξής:

$$MR = \frac{\bar{X} - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} \exp \left[-(2i+1)^2 \pi^2 D_{ef} \frac{t}{4L^2} \right] \quad (3.10)$$

Ωστόσο, σύμφωνα με τους [Lopez, et al., 2000], σε περιπτώσεις κατά τις οποίες τα υπό ξήρανση προϊόντα υπόκεινται σε μεγάλη διάρκεια ξήρανσης, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο ο πρώτος όρος της εξίσωσης 10:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp \left(-\pi^2 D_{ef} \frac{t}{4L^2} \right) \quad (3.11)$$

3.5.2.3 Προϊόν σφαιρικής γεωμετρίας

Κατ' αντιστοιχία για τα προϊόντα σφαιρικής γεωμετρίας ακτίνας r_0 η εξίσωση διάχυσης του Fick παρουσιάζει την εξής μορφή (Chen, et al., 2019):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \left(\frac{\partial^2 X}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial X}{\partial r} \right) \quad (3.12)$$

Με τις ακόλουθες αρχικές και συνοριακές συνθήκες:

- 1 Ομοιόμορφη αρχική υγρασία: $X(z / 0) = X_0$
- 2 Περιεκτικότητα υγρασίας στην επιφάνεια ίση με την υγρασία ισορροπίας: $X(z, t) = X(r, t) = X_e$

Σύμφωνα με τον (Cranck & J., 1975), εισάγοντας τον αδιάστατο μέσο λόγο υγρασίας για τις προαναφερθείσες αρχικές οριακές συνθήκες, η εξίσωση 8 μετατρέπεται ως εξής:

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i^2} \exp\left(-i^2 \pi^2 D_{ef} \frac{t}{r^2}\right) \quad (3.13)$$

Όπου οι όροι της σειράς για $i \geq 2$ αποκόβονται δίνοντας την εξής εξίσωση:

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\pi^2 D_{ef} \frac{t}{r^2}\right) \quad (3.14)$$

3.5.2.4 Συντελεστής διάχυσης D_{ef}

Για την εξέλιξη της μαθηματικής σχέσης μεταξύ της αποδοτικότητας διάχυσης της υγρασίας και των παραμέτρων της υγρασίας του δείγματος καθώς και της θερμοκρασίας, εφαρμόστηκαν μέθοδοι ανάλυσης παλινδρόμησης. Η επίδραση αυτών των παραμέτρων στην αποδοτικότητα διάχυσης της υγρασίας μοντελοποιήθηκε με τη χρήση πολυωνυμικών-εκθετικών εξισώσεων, όπως αναφέρεται στην εξίσωση (15).

Σε αυτή την προσέγγιση, η κύρια πρόκληση ήταν να καθοριστεί πώς η υγρασία και η θερμοκρασία του δείγματος επηρεάζουν τη δυναμική της διάχυσης υγρασίας. Μέσω της αναλυτικής προσέγγισης με τη χρήση της παλινδρόμησης, ήταν δυνατό να δημιουργηθεί μια πολύπλοκη αλλά εφαρμόσιμη σχέση που συνδέει αυτές τις βασικές μεταβλητές με την αποτελεσματικότητα της ξήρανσης (Chen, et al., 2019).

Η εξίσωση (15) αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο στην ανάλυση και κατανόηση των μηχανισμών ξήρανσης. Αυτή η εξίσωση παρέχει βαθύτερη επιστημονική κατανόηση στις διαδικασίες ξήρανσης και συμβάλλει στην ανάπτυξη πιο αποδοτικών και βιώσιμων τεχνικών ξήρανσης. Η εφαρμογή της επιτρέπει τη βελτίωση των τεχνικών ξήρανσης, προσφέροντας προβλέψεις και βελτιστοποιήσεις βασισμένες σε ακριβή δεδομένα και πολύπλοκες αναλυτικές προσεγγίσεις. Η εξίσωση αυτή είναι η εξής (Chen, et al., 2019):

$$D_{ef} = AX^3 + BX^2 + CX + D \quad (3.15)$$

όπου, τα A, B, C και D ήταν οι συντελεστές παλινδρόμησης (οι οποίοι είναι συναρτήσεις της θερμοκρασίας). Θα γίνει περαιτέρω χρήση και ανάλυση της συγκεκριμένης εξίσωσης στα επόμενα κεφάλαια, όταν θα δοθούν και οι συνθήκες ξήρανσης καθώς και τα φυσιολογικά χαρακτηριστικά του προϊόντος υπό ξήρανση. Δεδομένα τα οποία είναι απολύτως απαραίτητα για την επίλυσή της.

3.5.2.5 Ημιεμπειρικά μοντέλα διάχυσης

Τα ημιεμπειρικά μοντέλα αποτελούνται από εξισώσεις με εκθετική δομή, οι οποίες ενσωματώνουν ειδικές σταθερές. Αυτές οι σταθερές αντικατοπτρίζουν τη συνολική επίδραση των διαφορετικών παραμέτρων ξήρανσης στο υλικό και παρέχουν πληροφορίες για την δυναμική του υλικού καθ' όλη τη διάρκεια της ξήρανσης.

Ο [Lewis, 1921], πρωτοπόρος στον τομέα της ξήρανσης, ανέπτυξε την θεωρία ότι ο ρυθμός μεταβολής της υγρασίας ενός υλικού είναι ανάλογος με τη διαφορά μεταξύ της μέσης περιεκτικότητας σε υγρασία του υλικού και της υγρασίας στο σημείο ισορροπίας του. Αυτή η θεωρία έχει ονομαστεί ως εκθετικό, λογαριθμικό ή σχέση Newton λόγω της αναλογίας της με τον νόμο ψύξης του Newton. Αυτή η προσέγγιση είναι σημαντική για την κατανόηση και την πρόβλεψη της δυναμικής της ξήρανσης, καθώς επιτρέπει τη μοντελοποίηση της διαδικασίας με βάση την σχέση μεταξύ της υγρασίας και του χρόνου. Το μοντέλο αυτό έχει την εξής μορφή:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -k(\bar{X} - X_e) \quad (3.16)$$

Όπου k είναι μια σταθερά ξήρανσης σχετιζόμενη με τις συνθήκες του αέρα ξήρανσης.

Σύμφωνα με τον (Cranck & J., 1975), εισάγοντας τον αδιάστατο μέσο λόγο υγρασίας, η εξίσωση 16 μετατρέπεται ως εξής:

$$MR = \exp(-kt) \quad (3.17)$$

Εκτός από την πρωτοποριακή σχέση που διατύπωσε ο Lewis, έχουν αναπτυχθεί πολλαπλές άλλες εξισώσεις στο πεδίο της ξήρανσης. Η επιλογή της κατάλληλης εξίσωσης βασίζεται στην ικανότητά της να παρέχει την ακριβέστερη προσαρμογή στα συλλεχθέντα πειραματικά δεδομένα. Στον τομέα της ξήρανσης, η βιβλιογραφία αναγνωρίζει πληθώρα εξισώσεων που χρησιμοποιούνται ευρέως για την περιγραφή της διαδικασίας ξήρανσης, παρέχοντας σημαντικές ενδείξεις για την κατανόηση των μηχανισμών που διέπουν αυτήν τη διαδικασία.

Κάθε μία από αυτές τις εξισώσεις διαθέτει τα δικά της μαθηματικά χαρακτηριστικά και υποθέσεις, αντανακλώνοντας διάφορες πτυχές της φυσικής της ξήρανσης και της μεταφοράς μάζας. Η αποτελεσματική εφαρμογή τους προϋποθέτει την κατανόηση τόσο της θεωρίας που υποστηρίζει την κάθε εξίσωση όσο και της ευαισθησίας τους στις διάφορες λειτουργικές παραμέτρους. Οι δημοφιλέστερες εξισώσεις, όπως συγκεντρώθηκαν από τους [Akpinar & -E., 2006] και [Kane, et al., 2009], είναι οι εξής:

- Η εξίσωση του Page:

$$MR = \exp(-kt^n) \quad (3.18)$$

- Η τροποποιημένη εξίσωση του Page:

$$MR = \exp(-(kt)^n) \quad (3.19)$$

- Η εξίσωση Henderson και Padis:

$$MR = \alpha \exp(-kt) \quad (3.20)$$

- Η λογαριθμική εξίσωση:

$$MR = a \exp(-kt) + c \quad (3. 21)$$

Παρακάτω θα δοθεί ένας πίνακας με συγκεντρωμένα τα μαθηματικά μοντέλα που παρουσιάστηκαν στην συγκεκριμένη υποενότητα.

Όνομα μοντέλου	Μαθηματική έκφραση
Πλάκα άπειρου μήκους	$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\pi^2 D_{ef} \frac{t}{4L^2}\right)$
Σφαιρική Γεωμετρία	$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\pi^2 D_{ef} \frac{t}{r^2}\right)$
Σχέση Newton (Lewis)	$MR = \exp(-kt)$
Page	$MR = \exp(-kt^n)$
Τροποποιημένη Page	$MR = \exp(-(kt)^n)$
Henderson και Padis	$MR = \alpha \exp(-kt)$
Λογαριθμική	$MR = a \exp(-kt) + c$

Πίνακας 3.2 Μοντέλα και οι μαθηματικές τους εκφράσεις για την μοριακή διάχυση της ξήρανσης.

Κεφάλαιο 4 : Χαρακτηριστικά κελύφους καρυδιού ως βιομάζα

4.1 Εισαγωγή

Η επεξεργασία του καρυδιού αποτελεί μια πολυσύνθετη διαδικασία, που αρχίζει με τη συγκομιδή των καρυδιών και καταλήγει στην προετοιμασία τους για αγορά ή άλλη χρήση. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει βασικά στάδια όπως η συγκομιδή, η ξήρανση, η αποφλοιώση, και τελικά η συσκευασία των καρυδιών. Παράλληλα, το κέλυφος του καρυδιού κατέχει μια σημαντική θέση ως πηγή θερμογόνου-δυναμικότητας. Τα κελύφη των καρυδιών

είναι λιγνοκυτταρικά υλικά με υψηλή περιεκτικότητα σε ίνες και ενέργεια. Χρησιμοποιούνται ως βιομάζα για την παραγωγή ενέργειας, με την καύση τους να παρέχει θερμική ενέργεια για διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές. Επιπλέον, το κέλυφος μπορεί να αξιοποιηθεί και για την παραγωγή ενεργειακών προϊόντων υψηλής ποιότητας, όπως πέλετς και βιοκαύσιμα, συμβάλλοντας έτσι στην κυκλική οικονομία και στην αειφόρο αξιοποίηση των πόρων.

4.2 Επεξεργασία καρυδιού

Οι κρίσιμες φάσεις στην επεξεργασία του καρυδιού περιλαμβάνουν τα ακόλουθα βασικά στάδια:

1. Συγκομιδή

Η διαδικασία συγκομιδής καρυδιών ξεκινά όταν μεγάλο ποσοστό των καρυδιών στο δέντρο παρουσιάζει φαινόμενο σχισίματος των φλοιών τους, ενώ κάποια έχουν ήδη πέσει στο έδαφος. Αυτό σηματοδοτεί την είσοδο στο τελικό στάδιο ωρίμανσης. Η διαδικασία ωρίμανσης και σχισίματος του φλοιού μπορεί να επιταχυνθεί με τη χρήση ενώσεων παραγωγής αιθυλενίου όπως το ethephon, μια εφαρμογή που έχει καταγραφεί από ερευνητές όπως (Khir et al., 2012) και (Romas & D.E., 1998). Η συγκομιδή επιτυγχάνεται με τη χρήση μηχανικών δονητών που επιδρούν στον κορμό του δέντρου, προκαλώντας την πτώση των ωριμασμένων καρυδιών. Αυτά συλλέγονται και μεταφέρονται για την επόμενη φάση επεξεργασίας.

Τα καρύδια στη συνέχεια υποβάλλονται σε διαδικασία αποφλοιώσης όπου οι πράσινοι φλοιοί αφαιρούνται μηχανικά. Αυτή η διαδικασία είναι κρίσιμη, καθώς οι φλοιοί παρουσιάζουν υψηλή υγρασία και είναι ένα από τα κυρίαρχα παραπροϊόντα που παράγονται κατά τη διαδικασία. Η συνέχεια της επεξεργασίας περιλαμβάνει τη ξήρανση των καρυδιών με θερμό αέρα σε θερμοκρασία περίπου 43°C. Η ξήρανση στοχεύει στο να φέρει τα καρύδια σε ένα ασφαλές επίπεδο υγρασίας, περίπου 8% σε βάση υγρασίας, μία διαδικασία που έχει καταγραφεί εκτενώς στην επιστημονική βιβλιογραφία (Rumsey & Lu, 1991), (Kader, 2002), (Rumsey & Thompson, 1984), (Khir et al., 2014a) και (Khir et al., 2014b). Σε αυτό το στάδιο της υγρασίας, τα καρύδια έχουν επιτύχει μέγιστη αντοχή σε μούχλα, διαχρονικό αποχρωματισμό και ανάπτυξη ανεπιθύμητων γεύσεων. Τέλος, τα ξηραμένα καρύδια μεταφέρονται συνήθως σε κεντρικές εγκαταστάσεις για περαιτέρω επεξεργασία, όπως η αφαίρεση του κελύφους, μια διαδικασία που καθίσταται πιο βιώσιμη λόγω της κεντρικής μορφής επεξεργασίας, καθιστώντας επίσης δυνατή τη συλλογή και αξιοποίηση μεγάλων ποσοτήτων παραπροϊόντων.



Εικόνα 4.1 – Εμφάνιση καρυδιού έτοιμου για συγκομιδή.
(flowmagazine.gr, χ.χ.)



*Εικόνα 5.2 – Μηχάνημα δόνησης κορμού καρυδιάς.
(panagrotiki.gr, χ.χ.)*

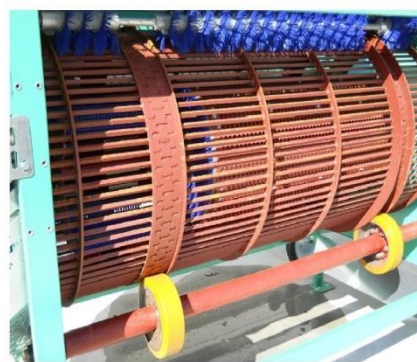
2. Αποφλοιώση

Πριν την έναρξη της ξήρασης, η αποφλοιώση των καρυδιών αποτελεί κρίσιμη επεξεργασία, όπου το εξωτερικό πράσινο φλοιό αφαιρείται μηχανικά. Η αποφλοιώση επιτυγχάνεται με την χρήση ειδικών μηχανημάτων αποφλοιώσης, τα οποία είναι ουσιαστικά περιστροφικά πλυντήρια υψηλής πίεσης και στο εσωτερικό τους διαθέτουν, συνήθως, πλάκες ξεφλουδίσματος για πιο αποδοτικό και γρηγορότερο αποτέλεσμα. Αυτός ο φλοιός, παρόλο που συχνά παραβλέπεται, αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό παραπροϊόν με οικονομικές ευκαιρίες, καθώς περιέχει φυσικές ενώσεις με αντιοξειδωτικές και αντιμικροβιακές ιδιότητες.

Ωστόσο, ένα σημαντικό ζήτημα που αναδύεται από την αποφλοιώση είναι ότι τα καρύδια, είτε με τους φλοιούς είτε χωρίς, μεταφέρονται από τους καρυδεώνες στους χώρους ξήρασης, κάτι που προκαλεί ανεπιθύμητες επιδράσεις στην αποδοτικότητα και την κατανάλωση ενέργειας (Atungulu & Pan, 2012). Η μεταφορά καρυδιών με φλοιούς, οι οποίοι έχουν μέση περιεκτικότητα σε υγρασία περίπου 85% σύμφωνα με την έρευνα των [Khir, et al., 2013], αυξάνει το ενεργειακό κόστος και την απαιτούμενη εργασία. Επιπρόσθετα, η

μεταφορά προκαλεί αυξημένες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, δημιουργώντας περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Η μέθοδος αποφλοιώσης επιτόπου (in-field dehulling) προτείνεται ως λύση για τη μείωση των προκλήσεων συνδεδεμένων με τη μεταφορά καρυδιών με φλοιούς. Καινοτόμες τεχνικές διαλογής καρυδιών, όπως εκείνες που βασίζονται σε αεροδυναμικές μεθόδους έχουν εξεταστεί για την αποτελεσματική διαλογή των καρυδιών με και χωρίς φλοιούς. Σύμφωνα με την έρευνα των (Khir et al., 2012), η χρήση αέρα με τερματική ταχύτητα 10m/s μπορεί να επιτύχει τον πλήρη διαχωρισμό των καρυδιών χωρίς φλοιούς από εκείνα με φλοιούς. Αυτή η μέθοδος ξηράς αποφλοιώσης επιτρέπει την εφαρμογή της αποφλοιώσης επιτόπου, ελαχιστοποιώντας την ανάγκη βύθισης των καρυδιών στο νερό.



Εικόνα 4.3 – Μηχάνημα αποφλοιώσης καρυδιών και το εσωτερικό τύμπανο. (panagrotiki.gr, χ.χ.)

3. Ξήρανση

Μετά τη συγκομιδή και την αποφλοιώση, τα καρύδια πρέπει να ξηραθούν πλήρως από την αρχική τους περιεκτικότητα σε υγρασία X_0 σε ένα επίπεδο X_e 8% (βάση υγρού) χρησιμοποιώντας συνήθως θερμό αέρα σε θερμοκρασία περίπου 43°C, σύμφωνα με τις συλλογικές μελέτες των (Khir et al., 2013), (Khir et al., 2014a) και (Romas & D.E., 1998). Σε αυτό το επίπεδο υγρασίας, τα καρύδια θεωρούνται ανθεκτικά σε μούχλα, αλλοίωση χρώματος, ανάπτυξη ανεπιθύμητων γεύσεων και λιπαρή οξείδωση (Kader, 2002) και (Rumsey & Thompson, 1984). Επιπλέον, τα ξηραμένα καρύδια μπορούν να τεθούν σε κατάσταση ισορροπίας υγρασίας για μακροχρόνια αποθήκευση.

Η διακύμανση της αρχικής περιεκτικότητας σε υγρασία μεταξύ των μεμονωμένων καρυδιών θεωρείται ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που επηρεάζουν την απόδοση και την αποδοτικότητα της ξήρανσης. Η αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία των μεμονωμένων καρυδιών διαφέρει σημαντικά λόγω της ανισόμετρης ωρίμανσης στο χωράφι. Τα καρύδια που πέφτουν από το δέντρο πριν από τη συγκομιδή είναι πολύ ξηρότερα επειδή έχουν φτάσει σε ωριμότητα. Αντίθετα, τα καρύδια που είναι λιγότερο ώριμα και πρέπει να αποκολληθούν από το δέντρο έχουν συνήθως υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία. Περίπου το 40%–50% των συγκομιδών καρυδιών έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία με επικολημένους φλοιούς. Τα καρύδια με φλοιούς είχαν μέση περιεκτικότητα σε υγρασία ίση με 32.99%, ενώ τα καρύδια χωρίς φλοιούς είχαν 13.86% (Khir et al., 2013), (Khir et al., 2014a), (Khir et al., 2014b) και (Romas & D.E., 1998).

Παρά την τεράστια διακύμανση της MC μεταξύ των μεμονωμένων καρυδιών, οι τρέχουσες εγκαταστάσεις ξήρανσης αναμιγνύουν καρύδια με μεγάλο εύρος αρχικής περιεκτικότητας σε υγρασία και τα ξηραίνουν ως ένα σύνολο χρησιμοποιώντας αέρα 43°C για ολόκληρη τη διαδικασία. Τα καρύδια που εισέρχονται στο ξηραντήριο με υψηλή αρχική X_0 μπορεί να καταλήξουν με X_e 10% ή υψηλότερη, που είναι πάνω από την επιδιωκόμενη ασφαλή αποθηκευτική X_e του 8% [Kader, 2002] και (Rumsey & Thompson, 1984). Ως εκ τούτου, τα καρύδια με υψηλότερη X_0 πρέπει να ξηραθούν περισσότερο για να φτάσουν στην ασφαλή αποθηκευτική X_e . Από την άλλη πλευρά, η έκθεση των καρυδιών με χαμηλότερη X_0 μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολική ξήρανση, η οποία χρησιμοποιεί σημαντικές ποσότητες ενέργειας, παρατείνει τον χρόνο ξήρανσης και μειώνει την ποιότητα του ξηραμένου προϊόντος.

Έχει αναφερθεί ότι η ταξινόμηση των καρυδιών που έχουν συγκομισθεί με κέλυφος, βάσει της περιεκτικότητας τους σε υγρασία πριν από την ξήρανση, μπορεί να ξεπεράσει τις αδυναμίες των τρεχουσών πρακτικών ξήρανσης. Επιπλέον διαπιστώθηκε ότι τα κελύφη των καρυδιών περιείχαν περισσότερη υγρασία από τους πυρήνες των καρυδιών. Αυτό σημαίνει ότι τα καρύδια μπορούν να ξηραθούν σε αυξημένες θερμοκρασίες κατά το πρώτο μέρος της διαδικασίας ξήρανσης, όταν η θερμοκρασία του πυρήνα του καρυδιού ήταν σημαντικά χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του αέρα ξήρανσης. Οι αυξημένες θερμοκρασίες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να απομακρύνουν την περισσότερη υγρασία από τα κελύφη των καρυδιών με υψηλή υγρασία χωρίς να επηρεάζεται η ποιότητα του προϊόντος (Khir et al., 2013), (Khir et al., 2014a), (Khir et al., 2014b), (Rumsey & Lu, 1991) [Lowe et al., 1961] και [Thompson et al., 1985].

Επιπλέον, αναφέρεται ότι υπάρχει δυνατότητα χρήσης της θερμικής ακτινοβολίας υπέρυθρων (IR) για τη γρήγορη αφαίρεση μέρους της υγρασίας του κελύφους, ιδιαίτερα για ταξινομημένα καρύδια με υψηλή υγρασία, ώστε να επιτευχθεί μερική ξήρανση και να ξεπεραστούν τα εμπόδια της τρέχουσας μεθόδου χαμηλής θερμοκρασίας ξήρανσης (Pan et al., 2018). Η ερευνητική ομάδα του εργαστηρίου επεξεργασίας τροφίμων στο Τμήμα Βιολογικής και Γεωργικής Μηχανικής του Πανεπιστημίου της Καλιφόρνιας, (Davis et al., 2007) διεξήγαγε εκτεταμένες δοκιμές για την ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικής τεχνολογίας ξήρανσης χρησιμοποιώντας θερμική ακτινοβολία υπέρυθρων και ταξινόμηση των καρυδιών βάσει της περιεκτικότητας τους σε υγρασία πριν την ξήρανση. Η ομάδα επιβεβαίωσε ότι η θερμική ακτινοβολία υπέρυθρων αφαιρούσε γρήγορα την υγρασία του κελύφους και της επιφάνειας των καρυδιών χωρίς να επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα των ξηραμένων καρυδιών. Η προ-ξήρανση με υπέρυθρη ακτινοβολία υψηλής υγρασίας για 3 και 4 λεπτά μείωσε σημαντικά την ποσότητα υγρασίας, η οποία μεταφράζεται σε 1 και 3 ώρες του συμβατικού χρόνου ξήρανσης με χαμηλή θερμοκρασία. Κατά την προ-ξήρανση των καρυδιών υψηλής υγρασίας, η θερμοκρασία του πυρήνα του καρυδιού παρέμενε σημαντικά κάτω από τους 43°C στα πρώτα 150 δευτερόλεπτα, παρέχοντας χρόνο για την απομάκρυνση σημαντικής ποσότητας υγρασίας ενώ διατηρούνταν η ποιότητα του προϊόντος.

Η μελέτη των (Pan et al., 2018) επιβεβαίωσε την τεχνική εφικτότητα της χρήσης της ξήρανσης με υπέρυθρη ακτινοβολία (IR) ως μιας ενεργειακά αποδοτικής τεχνολογίας ξήρανσης για τα καρύδια. Διαπίστωσαν ότι μεγάλο μέρος του χρόνου και της ενέργειας ξήρανσης των καρυδιών θα μπορούσε να εξοικονομηθεί μέσω της διαχωριστικής ταξινόμησης των καρυδιών με κέλυφος σε δύο ομάδες υγρασίας πριν την ξήρανση και της προ-ξήρανσης των καρυδιών χρησιμοποιώντας ανάλογους εκπομπείς υπέρυθρων για τη γρήγορη απομάκρυνση της επιφανειακής υγρασίας. Η ταξινόμηση των καρυδιών και η προ-ξήρανση με υπέρυθρη ακτινοβολία βελτίωσε επίσης την ποιότητα των καρυδιών μειώνοντας την υπερξήρανση και την υποξήρανση τους.

Οι (Pan et al., 2018) σχεδίασαν, κατασκεύασαν, δοκίμασαν και παρουσίασαν επίσης δύο ξηραντήρια καρυδιών με υπέρυθρη ακτινοβολία. Τα αποτελέσματα δοκιμών από μια πιλοτική εγκατάσταση ξήρανσης με υπέρυθρη ακτινοβολία έδειξαν ότι η θερμική ακτινοβολία για 150, 180 και 240 δευτερόλεπτα οδήγησε σε θερμοκρασίες πυρήνα του καρυδιού 40°C, 45°C και 50°C αντίστοιχα. Η θερμική ακτινοβολία αφαίρεσε σημαντικά την υγρασία από το κέλυφος του καρυδιού σε σύγκριση με τον πυρήνα του. Οι μελέτες κατανάλωσης ενέργειας έδειξαν ότι η ταξινόμηση των καρυδιών σε δύο ομάδες υγρασίας και

η ξήρανσή τους ξεχωριστά θα μπορούσε να εξοικονομήσει έως και 28.80% της ενέργειας που χρησιμοποιείται για την ξήρανση μη ταξινομημένων καρυδιών, αποτρέποντας την υπερξήρανση. Η ενέργεια που εξοικονομήθηκε μόνο από την προ-ξήρανση με υπέρυθρη ακτινοβολία βρέθηκε να είναι 11.68%, 12.81% και 11.70% με τη θερμική ακτινοβολία των καρυδιών σε θερμοκρασίες πυρήνα 40°C, 45°C και 50°C αντίστοιχα. Επιπλέον, οι (Pan, et al., 2018)δοκίμασαν επίσης έναν εμπορικής κλίμακας ξηραντήρα καρυδιών με υπέρυθρη ακτινοβολία με χωρητικότητα 10-15 τόνων ανά ώρα για την προ-ξήρανση των καρυδιών με θέρμανση του πυρήνα στους 50°C. Διαπίστωσαν ότι η προ-ξήρανση των καρυδιών μειώνει τον χρόνο ξήρανσης με ζεστό αέρα κατά 13.55%–26.50% σε σύγκριση με καρύδια χωρίς προ-ξήρανση με την ίδια αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία. Η προ-ξήρανση οδήγησε σε εξοικονόμηση ενέργειας 9.96%–19.94% σε σύγκριση με καρύδια που ξηράθηκαν χωρίς προ-ξήρανση, ανάλογα με τον χρόνο θέρμανσης υπέρυθρων και την αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία των καρυδιών.

4. Αποθήκευση

Η φάση αποθήκευσης των καρυδιών μετά την ολοκλήρωση της ξήρανσης αποτελεί σημαντικό στάδιο στην επεξεργασία τους, όπου τα ξηραμένα καρύδια μεταφέρονται σε ειδικά εργοστάσια συσκευασίας για προσωρινή αποθήκευση. Η στρατηγική αυτή συμβάλλει στη διατήρηση της πλούσιας γεύσης, της τραγανής υφής και των θρεπτικών οφελών των καρυδιών. Τα καρύδια είναι ευαίσθητα σε μούχλα λόγω του υψηλού περιεχομένου τους σε λιπαρά, και για το λόγο αυτό, η σωστή αποθήκευση είναι κρίσιμη. Σύμφωνα με τις μελέτες του (Woodroof, 1967), κρίσιμοι παράγοντες όπως η υγρασία, η θερμοκρασία, η φωτεινότητα και η ατμοσφαιρική υγρασία μπορούν να επηρεάσουν την ποιότητα των καρυδιών.

Η βέλτιστη σταθερότητα σε γεύση και χρώμα των πυρήνων καρυδιού επιτυγχάνεται σε συνθήκες 4% υγρασίας, 55% σχετικής υγρασίας και θερμοκρασίας 4.5°C, όπου τα καρύδια μπορούν να διατηρηθούν για μέχρι και 18 μήνες. Σε πιο χαμηλές θερμοκρασίες, κάτω των 3.3°C, τα καρύδια παραμένουν σταθερά σε ένα εύρος υγρασίας μεταξύ 1.5% και 6.0% και σχετικής υγρασίας από 55% έως 56%, προσφέροντας μεγαλύτερη διάρκεια αποθήκευσης. Για τη μακροχρόνια διατήρηση των ξεφλουδισμένων καρυδιών, συνιστάται η αποθήκευση σε ψυγείο μέσα σε αεροστεγή δοχεία για περίοδο έως και έξι μήνες ή η κατάψυξή τους για έως ένα χρόνο.

5. Σπάσιμο κελύφους

Η διαδικασία διαχείρισης καρυδιών μετά την συγκομιδή και μέχρι την παράδοση στην αγορά περιλαμβάνει βασικά βήματα όπως η αποφλοιώση, ταξινόμηση, σπάσιμο και τελική επεξεργασία. Αρχικά, τα καρύδια ταξινομούνται ανάλογα με το μέγεθός τους, σύμφωνα με συγκεκριμένα πρότυπα, σε κατηγορίες μεγάλα, μεσαία ή μικρά (Woodroof, 1967). Αυτή η διαδικασία είναι ζωτικής σημασίας για την ομοιόμορφη επεξεργασία των καρυδιών κατά τα επόμενα στάδια.

Στη συνέχεια, τα καρύδια υφίστανται μηχανική αποφλοιώση με ειδικά σχεδιασμένο εξοπλισμό για τον διαχωρισμό του κελύφους από τον πυρήνα. Αυτή η διαδικασία είναι κρίσιμη για την παραγωγή ποιοτικών και αέριων πυρήνων. Κατά την αποφλοιώση, χρησιμοποιούνται μέθοδοι αέρα και ηλεκτρονική λέιζερ-ταξινόμηση για τον διαχωρισμό και την αφαίρεση του κελύφους και την κατάταξη των πυρήνων ανάλογα με το χρώμα και την ποιότητά τους.

Τα καρύδια που έχουν υποστεί αποφλοιώση ελέγχονται και πιστοποιούνται για να πληρούν τα πρότυπα και τις προδιαγραφές των πελατών, πριν συσκευαστούν και διατεθούν στην αγορά. Η τελική συσκευασία των πυρήνων καρυδιών προσαρμόζεται ανάλογα με τις απαιτήσεις της αγοράς.

Ειδικό ενδιαφέρον παρουσιάζεται, λοιπόν, στο κέλυφος του καρυδιού που αποτελεί το λιγνοκυτταρικό υλικό του ενδοκαρπίου του καρπού, προσφέροντας σημαντικές δυνατότητες για χρήση σε προϊόντα προστιθέμενης αξίας, καθώς περιέχει πολύτιμα συστατικά με διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές. Σε αυτό το στάδιο είναι που παραλαμβάνεται αυτό το εξαιρετικά πολύτιμο υλικό, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί ως βιοκαύσιμο του οποίου η θερμοδυναμικότητα του θα αναλυθεί παρακάτω.



Εικόνα 4.4 – Σπαστήρας καρυδιών. (tmagro.com, χ.χ.)

4.3 Θερμογόνος δύναμη κελύφους καρυδιού

4.3.1 Εισαγωγή

Η Ανώτατη Θερμογόνος Δύναμη (Higher Heating Value, HHV) αναφέρεται στη μέγιστη ποσότητα θερμικής ενέργειας που μπορεί να απελευθερωθεί κατά την πλήρη καύση μιας δεδομένης ποσότητας καυσίμου υπό συνθήκες σταθερής πίεσης. Σε αυτή τη διαδικασία, τα προϊόντα καύσης υποβάλλονται σε ψύξη μέχρι το σημείο όπου το νερό που περιέχουν συμπυκνώνεται σε υγρή μορφή. Το νερό που συμπυκνώνεται μπορεί να προέρχεται είτε από την καύση του υδρογόνου που βρίσκεται στο καύσιμο είτε από την υγρασία που περιέχεται σε αυτό. Κατά την μέτρηση της HHV με τη χρήση ενός θερμιδομέτρου, η συμπύκνωση του νερού απελευθερώνει τη λανθάνουσα θερμότητα της εξάτμισης, η οποία συμπεριλαμβάνεται στη συνολική μετρούμενη θερμική ενέργεια.

Η Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη (Lower Heating Value, LHV), από την άλλη πλευρά, δεν περιλαμβάνει τη λανθάνουσα θερμότητα εξατμίσεως του νερού.

Στην περίπτωση της βιομάζας, η υγρασία που περιέχεται εντός των νεκρών κυττάρων και των κυτταρικών τοιχωμάτων επηρεάζει την HHV. Στην περίπτωση αυτή, η ανώτερη θερμογόνος δύναμη των καυσίμων βιομάζας συχνά εκφράζεται ως HHV_d, η οποία προσδιορίζεται μέσω της μέτρησης της θερμικής ενέργειας που προκύπτει από την καύση σε ένα θερμιδόμετρο.

Η θερμική ενέργεια που μετριέται μπορεί να εκφραστεί μέσω διαφόρων μονάδων μέτρησης, όπως οι θερμίδες (cal), οι βρετανικές θερμικές μονάδες (BTU), ή τα Joules (J). Μία θερμίδα ισοδυναμεί με 4,1868 Joules και αντιστοιχεί περίπου στη θερμική ενέργεια απαιτούμενη για την αύξηση της θερμοκρασίας ενός γραμμαρίου νερού κατά ένα βαθμό Κελσίου στους 15 °C.

Μία βρετανική θερμική μονάδα ισούται με 251.996 θερμίδες και αντιστοιχεί περίπου στην ίδια ποσότητα ενέργειας απαιτούμενη για την αύξηση της θερμοκρασίας ενός κιλού νερού κατά ένα βαθμό Φαρενάιτ στους 60 °F.

4.3.2 Προσδιορισμός της ανώτερης θερμογόνου δύναμης του κελύφους του καρυδιού
Ο (Γκίνης, 2022) μελέτησε δείγματα από πυρήνες ροδάκινου, βερίκοκου και τσόφλια από καρύδι, αμύγδαλο, φιστίκι και ηλιόσπορο για τον πειραματικό προσδιορισμό της ανώτερης θερμογόνου δύναμης διάφορων στερεών καυσίμων βιομάζας. Η ανώτερη θερμογόνος δύναμη υπολογίστηκε με τη βοήθεια μίας συσκευής θερμιδομέτρησης τύπου οξυγόνου (Oxygen Bomb Calorimeter).



Εικόνα 4.5 - Θερμιδόμετρο Parr 6050 (Γκίνης, 2022)

Για την επεξεργασία των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε η εξής εξίσωση:

$$HHV = HHV_d \times \left(1 - \frac{X}{100}\right) \quad (4.1)$$

Όπου, HHV_d είναι η θερμογόνος δύναμη της βιομάζας λόγω υγρασίας (MJ/kg). HHV ή GHV είναι η προκύπτουσα ανώτερη θερμογόνος δύναμη από το θερμιδόμετρο (MJ/kg). X είναι η περιεκτικότητα σε υγρασία.

Απλοποιώντας, η εξίσωση 22 παίρνει την εξής μορφή:

$$HHV_d = \frac{HHV}{\left(1 - \frac{X}{100}\right)} \quad (4.2)$$

Παρακάτω δίνεται ο πίνακας με τις τιμές της ανώτερης θερμογόνου δύναμης διάφορων γεωργικών αποβλήτων που μετρήθηκε με το όργανο κατά το πειραματικό έργο του (Γκίνης, 2022) :

A/A	ΔΕΙΓΜΑΤΑ	ΒΑΡΟΣ (gr)	GHV (MJ/kg)	ΔΤ (°C)
1	ΗΛΙΟΣΠΟΡΟΣ	1,01	18,70	3,34
2		1,32	17,98	4,20
3		1,25	17,94	3,98
4	ΚΟΥΚΟΥΤΣΙ	1,04	17,79	3,30
5		1,16	17,97	3,70
6		ΒΕΡΙΚΟΚΟΥ	0,95	18,22
7	ΑΜΥΓΔΑΛΟ	0,98	15,46	2,70
8		0,82	17,67	2,60
9		0,83	17,23	2,55
10	ΚΕΛΥΦΟΣ	1,11	16,59	3,27
11		0,93	17,14	2,83
12		ΚΑΡΥΔΙΟΥ	0,94	17,08
13	ΚΟΥΚΟΥΤΣΙ	0,99	18,21	3,20
14		0,79	17,76	2,50
15		ΡΟΔΑΚΙΝΟΥ	0,89	17,99
16	ΦΥΣΤΙΚΙ	0,97	20,03	3,46
17		0,92	19,99	3,27
18		0,89	19,73	3,12

Πίνακας 4.2 – Μετρημένη θερμογόνος δύναμη διάφορων γεωργικών αποβλήτων. (Γκίνης, 2022)

Συνεπώς, αξιοποιώντας την εξίσωση 23 υπολογίζονται οι τιμές της ανώτερης θερμογόνου δυνάμεως, οι οποίες δίνονται και στο παρακάτω πίνακα:

A/A	ΔΕΙΓΜΑΤΑ	GHV (MJ/kg)	HHV_d (MJ/kg)
1	ΗΛΙΟΣΠΟΡΟΣ	18,70	19,92
2		17,98	19,15
3		17,94	19,11
4	ΚΟΥΚΟΥΤΣΙ	17,79	19,03
5		17,97	19,22
6		ΒΕΡΙΚΟΚΟΥ	18,22
7	ΑΜΥΓΔΑΛΟ	15,46	16,35
8		17,67	18,69
9		17,23	18,22
10	ΚΕΛΥΦΟΣ	16,59	18,28
11		17,14	18,89
12		ΚΑΡΥΔΙΟΥ	17,08
13	ΚΟΥΚΟΥΤΣΙ	18,21	19,37
14		17,76	18,88
15		ΡΟΔΑΚΙΝΟΥ	17,99
16	ΦΥΣΤΙΚΙ	20,03	21,16
17		19,99	21,12
18		19,73	20,84

Πίνακας 4.3 – Τιμές ανώτερης θερμογόνου δυνάμεως.

Τέλος, θα υπολογιστούν και θα δοθούν οι μέσες τιμές της μετρήσιμης θερμογόνου δύναμης από το όργανο, αλλά και οι μέσες τιμές της ανώτερης θερμογόνου δύναμης για κάθε δείγμα με τον παρακάτω πίνακα:

ΔΕΙΓΜΑΤΑ	GHV av. (MJ/kg)	HHV_d av. (MJ/kg)
ΗΛΙΟΣΠΟΡΟΣ	18,21	19,39
ΚΟΥΚΟΥΤΣΙ ΒΕΡΙΚΟΚΟΥ	17,99	19,24
ΑΜΥΓΔΑΛΟ	16,79	17,75
ΚΕΛΥΦΟΣ ΚΑΡΥΔΙΟΥ	16,94	18,66
ΚΟΥΚΟΥΤΣΙ ΡΟΔΑΚΙΝΟΥ	17,99	19,12
ΦΥΣΤΙΚΙ	19,91	21,04

Πίνακας 4.4 – Μέσοι όροι μετρούμενης και ανώτερης θερμογόνου δύναμης.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία και πιο συγκεκριμένα στο επόμενο κεφάλαιο θα χρησιμοποιηθούν οι μέσες τιμές, μετρούμενης και ανώτερης θερμογόνου δύναμης, του κελύφους του καρυδιού.

GHV = 16,94 MJ/kg και HHV_d = 18,66 MJ/kg

Κεφάλαιο 5 : Σχεδιασμός και μοντελοποίηση λειτουργίας ξηραντήριου καρυδιού με χρήση βιομάζας.

5.1 Εισαγωγή

Ο σχεδιασμός του θαλάμου ξήρανσης σε μια εγκατάσταση ξήρανσης διαμορφώνεται με βάση τη χωρητικότητά του στην επεξεργασία νωπών προϊόντων, η οποία αντικατοπτρίζει τη δυναμικότητα που απαιτείται από το ξηραντήριο για την παραγωγή του τελικού ξηρού προϊόντος. Συνεπώς, η συνολική ποσότητα του τελικού προϊόντος που προβλέπεται να παραχθεί σε κάθε κύκλο λειτουργίας του ξηραντήριου έχει άμεση σχέση με τις διαστάσεις και τον όγκο του θαλάμου ξήρανσης. Επιπλέον, η επιλογή των συνθηκών του αέρα ξήρανσης, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία και ο ρυθμός κυκλοφορίας του αέρα, καθορίζονται με βάση τις φυσικές ιδιότητες και τη συμπεριφορά του προϊόντος κατά τη διαδικασία ξήρανσης, καθώς αυτές οι παράμετροι επηρεάζουν άμεσα τον απαιτούμενο χρόνο για την ολοκλήρωση της διαδικασίας.

Στη σχετική βιβλιογραφία, η πρακτική για τον σχεδιασμό των ξηραντήριων δεν είναι ευρέως τυποποιημένη. Αντίθετα, η έρευνα επικεντρώνεται στην ανάλυση των λειτουργικών χαρακτηριστικών, κυρίως σε πιλοτική κλίμακα, με στόχο τον καθορισμό των βέλτιστων συνθηκών ξήρανσης. Η στοχευμένη διερεύνηση περιλαμβάνει την αξιολόγηση της επίδρασης διάφορων παραμέτρων, όπως η υγρασία του αέρα, η θερμοκρασία, ο ρυθμός ανανέωσης του αέρα και η διανομή του αέρα εντός του θαλάμου, στην αποδοτικότητα της ξήρανσης και την ποιότητα του τελικού προϊόντος.

Συμπερασματικά, ο σχεδιασμός ενός ξηραντήριου απαιτεί μια προσεκτική εξέταση και προσαρμογή με βάση τις ειδικές ανάγκες της παραγωγής. Οι κύριες παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη περιλαμβάνουν την επιθυμητή δυναμικότητα του ξηραντήριου, τον συνολικό χρόνο ξήρανσης και τις συνθήκες εσωτερικού περιβάλλοντος, οι οποίες συνδέονται άμεσα με την ποσότητα και την ποιότητα του τελικού προϊόντος που παράγεται ανά κύκλο λειτουργίας, καθώς και με την οικονομική αποδοτικότητα της διαδικασίας ξήρανσης.

5.2 Σχεδιασμός θαλάμου για ξήρανση καρυδιού

Ο σχεδιασμός ενός θαλάμου ξήρανσης για καρύδια πρέπει να λαμβάνει υπόψη διάφορες κρίσιμες παραμέτρους για να εξασφαλίζει την ομοιόμορφη και αποδοτική ξήρανση των καρυδιών. Παρακάτω αναφέρονται κάποια βασικά στοιχεία για τον σχεδιασμό ενός τέτοιου θαλάμου:

- Χωρητικότητα και Διαστάσεις: Η χωρητικότητα του θαλάμου πρέπει να καθορίζεται ανάλογα με τον αναμενόμενο όγκο παραγωγής καρυδιών. Για παράδειγμα, ένας μικρός θάλαμος μπορεί να είναι κατάλληλος για μικρομεσαίες εκμεταλλεύσεις, ενώ μεγαλύτεροι θάλαμοι απαιτούνται για βιομηχανική παραγωγή.
- Σύστημα Θέρμανσης και Κυκλοφορίας Αέρα: Ο θάλαμος ξήρανσης πρέπει να διαθέτει ένα αποδοτικό σύστημα θέρμανσης και κυκλοφορίας αέρα. Η ομοιόμορφη κυκλοφορία ζεστού αέρα είναι κρίσιμη για την ομοιόμορφη ξήρανση των καρυδιών και την αποφυγή της μούχλας ή άλλων προβλημάτων ποιότητας.
- Θερμοκρασία και Υγρασία: Η ιδανική θερμοκρασία για την ξήρανση καρυδιών κυμαίνεται συνήθως από 35°C έως 45°C. Η υγρασία πρέπει επίσης να ελέγχεται για να διασφαλιστεί ότι τα καρύδια ξηραίνονται αποτελεσματικά χωρίς να υποστούν ζημία.
- Διάρκεια Ξήρανσης: Η διάρκεια ξήρανσης μπορεί να κυμαίνεται από μερικές ώρες έως μερικές ημέρες, ανάλογα με την τεχνολογία ξήρανσης και τις συνθήκες λειτουργίας.
- Ελέγχους και Συστημάτων Αυτοματισμού: Σύγχρονοι θάλαμοι ξήρανσης συχνά περιλαμβάνουν συστήματα ελέγχου και αυτοματισμού για να διατηρούν σταθερές τις συνθήκες ξήρανσης και να βελτιστοποιούν την αποδοτικότητα.
- Υλικά Κατασκευής: Τα υλικά κατασκευής του θαλάμου πρέπει να είναι ανθεκτικά στη θερμότητα και την υγρασία και να είναι εύκολα καθαριζόμενα για να διατηρείται η υγιεινή.

Ειδικότερα, τα ξηραντήρια καρυδιών και γενικότερα ξηρών καρπών είναι ξηραντήρια συναγωγής ή ξηραντήρια με δίσκους. Οι θάλαμοι ξήρανσης στα ξηραντήρια συναγωγής μπορούν να κατηγοριοποιηθούν βάσει της διαδρομής και της κατεύθυνσης που ακολουθεί ο θερμός αέρας ξήρανσης σε σχέση με την τοποθέτηση του νωπού προϊόντος. Υπάρχουν κυρίως δύο βασικοί τύποι συστημάτων ξήρανσης, τα ξηραντήρια παράλληλης ροής και τα ξηραντήρια εγκάρσιας ροής.

Στα ξηραντήρια παράλληλης ροής, ο θερμός αέρας κινείται παράλληλα προς το επίπεδο τοποθέτησης του προϊόντος, διερχόμενος από το τελάρο με το προϊόν. Αντίθετα, στα ξηραντήρια εγκάρσιας ροής, ο θερμός αέρας κινείται κάθετα στο επίπεδο τοποθέτησης του προϊόντος, περνώντας διαμέσου του τελάρου.

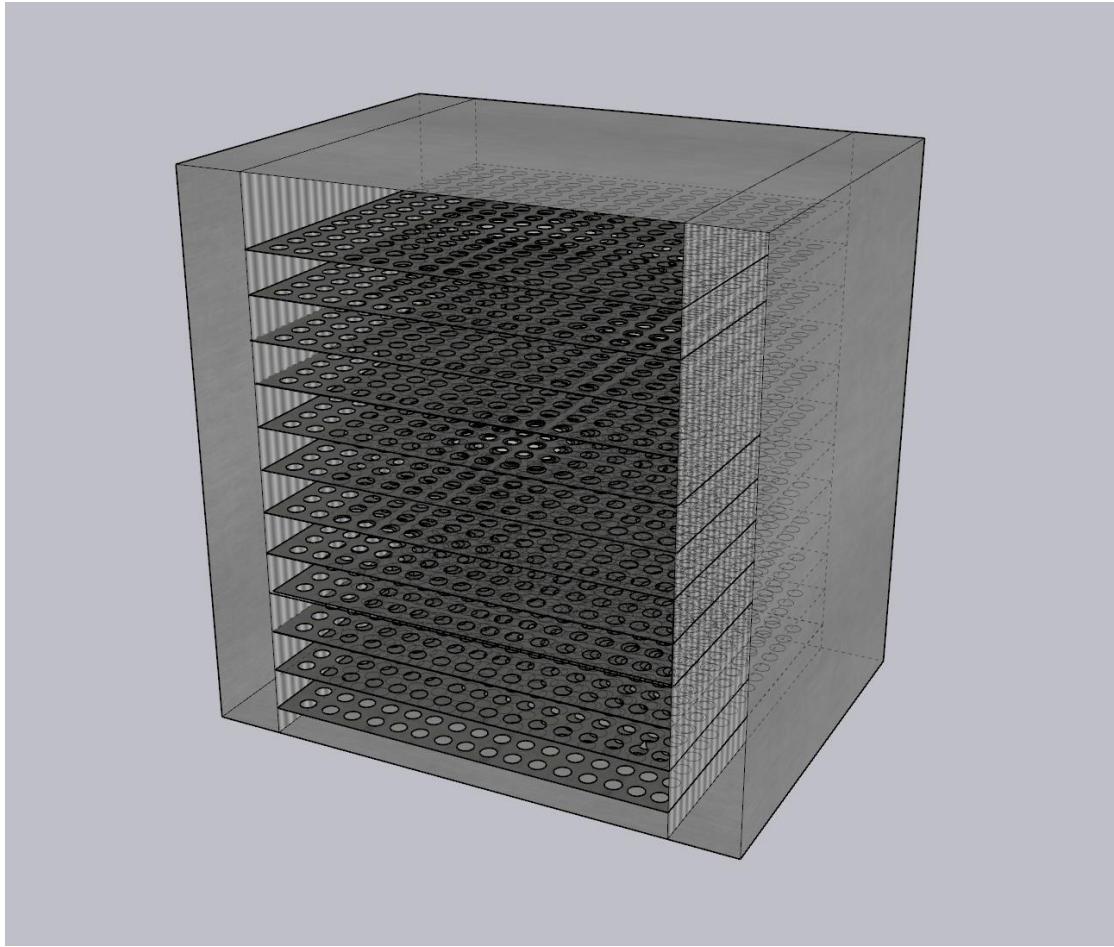
Τα ξηραντήρια εγκάρσιας ροής, αν και παρουσιάζουν ταχύτερους χρόνους ξήρανσης σε σχέση με τα ξηραντήρια παράλληλης ροής, εμφανίζουν σημαντικές πτώσεις πίεσης και δυναμικότητας λόγω της κάθετης διέλευσης και κορεσμού του αέρα σε υγρασία σε μεγαλύτερο ύψος αντίστοιχα. Η ανομοιομορφία της ξήρανσης, που συναντάται στα συστήματα εγκάρσιας ροής, μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη χρήση διάτρητων τελάρων και με την εφαρμογή υψηλών ταχυτήτων ροής αέρα, όπως επισημαίνεται από τους (Μπελεσιώτης & Δεληγιάννη, 2009). Για τους παραπάνω λόγους, στην προκείμενη μελέτη, επιλέχθηκε η χρήση του συστήματος εγκάρσιας ροής αέρα για την ξήρανση του προϊόντος, λαμβάνοντας υπόψη τις προκλήσεις και τις λύσεις που σχετίζονται με αυτή την επιλογή.

Για τη σχεδίαση του θαλάμου ξήρανσης ενός ξηραντήριου, αποφασίστηκε η υιοθέτηση των διαστάσεων περίπου 2 μέτρα μήκος, 1,5 μέτρα πλάτος και 2 μέτρα ύψος, επιτρέποντας επαρκή χώρο για την τοποθέτηση πολλαπλών ραφιών και εξασφαλίζοντας καλή κυκλοφορία του αέρα. Για να καθορίσουμε τον αριθμό των ραφιών και το ύψος τους σε ένα ξηραντήριο καρυδιών με τις δοθείσες διαστάσεις (2 μέτρα μήκος, 1,5 μέτρα πλάτος, και 2 μέτρα ύψος), και λαμβάνοντας υπόψη την εγκάρσια ροή θερμού αέρα, πρέπει να συνυπολογίσουμε ορισμένες βασικές παραμέτρους. Η απόσταση μεταξύ των ραφιών επηρεάζει την ομοιόμορφη κυκλοφορία του θερμού αέρα και την αποδοτική ξήρανση των καρυδιών. Μια τυπική απόσταση μπορεί να είναι περίπου 10 εκατοστά, επιτρέποντας επαρκή ροή αέρα γύρω από κάθε παρτίδα καρυδιών. Το ύψος του κάθε ραφιού μπορεί να κυμαίνεται με βάση τον συνολικό διαθέσιμο χώρο και την απαιτούμενη χωρητικότητα. Ένα τυπικό ύψος ραφιού μπορεί να είναι περίπου 5 εκατοστά, αναλόγως του μεγέθους των καρυδιών και της ανάγκης για αερισμό μεταξύ τους. Έχοντας υπόψη το συνολικό ύψος του θαλάμου (2 μέτρα) και προβλέποντας την ανάγκη για επαρκή χώρο κυκλοφορίας του αέρα πάνω και κάτω από το πρώτο και το τελευταίο ράφι αντίστοιχα, καθώς και την απόσταση μεταξύ των ραφιών, μπορούμε να υπολογίσουμε τον πιθανό αριθμό των ραφιών ως εξής, αφαιρώντας περίπου 20 εκατοστά από το συνολικό ύψος για τον αέρα που κυκλοφορεί στο κάτω και στο πάνω μέρος του θαλάμου (10 εκατοστά κάθε ένα), μένουν 180 εκατοστά διαθέσιμα για την τοποθέτηση των ραφιών. Με τα ράφια να έχουν ύψος 5 εκατοστά και να τοποθετούνται σε απόσταση 10 εκατοστά το ένα από το άλλο, κάθε μονάδα ραφιού (ράφι + απόσταση για την

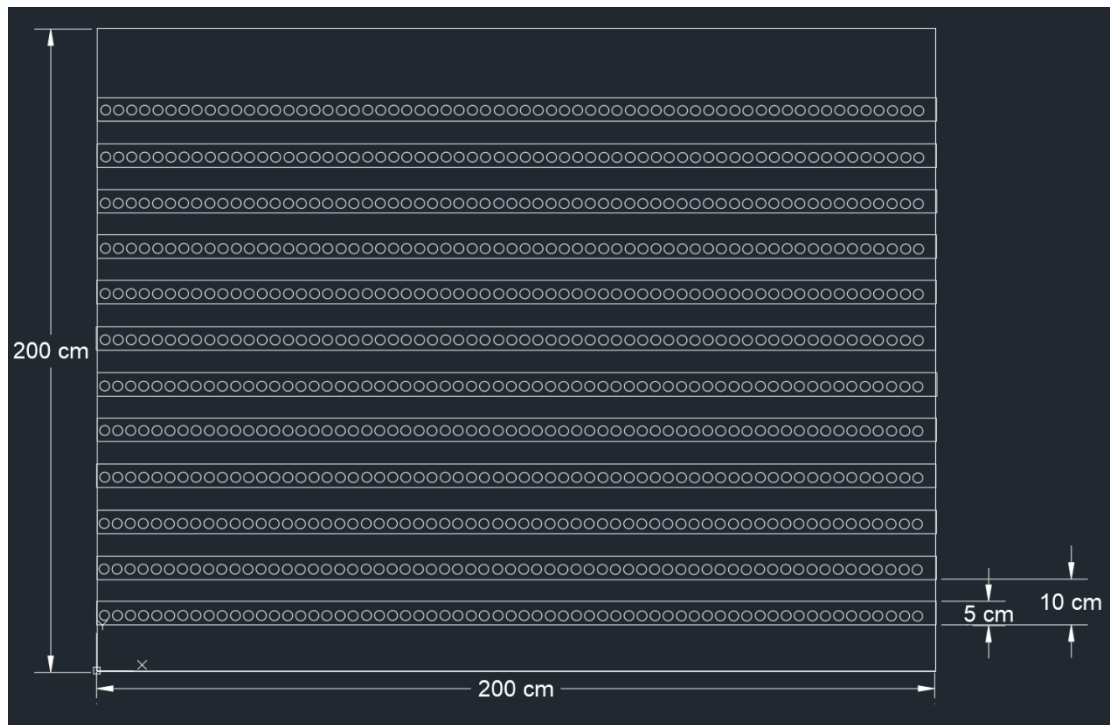
επόμενη τοποθέτηση) θα απαιτούσε περίπου 15 εκατοστά ύψος. Από αυτό προκύπτει ότι ο συνολικός διαθέσιμος χώρος μπορεί να υποστηρίξει περίπου 12 διάτρητα ράφια $1.5 \times 1 \times 0.05$ (180 εκατοστά διαθέσιμο ύψος / 15 εκατοστά ανά μονάδα ραφίου), δίνοντας έναν αρκετά μεγάλο αριθμό ραφιών για την ξήρανση των καρυδιών. Οι συγκεκριμένες σχεδιαστικές αποφάσεις λήφθηκαν με στόχο την ανάλυση ορισμένων βασικών παραμέτρων της διάταξης του ξηραντήριου, χωρίς την πρόθεση βελτιστοποίησης του σχεδιασμού του στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης.

Το ύψος του ξηραντήριου κρίθηκε ιδανικό σε σχέση με τις απώλειες θερμότητας κατά τη διαδικασία ξήρανσης με θερμό αέρα, επιλέγοντας έτσι ένα μέγεθος θαλάμου που εξισορροπεί αποδοτικότητα και θερμική απόδοση. Η διάταξη και ο αριθμός των τελάρων ορίστηκαν με βάση τις διαστάσεις του κελύφους και το πάχος των τελάρων, με στόχο τη διασφάλιση της κατάλληλης ταχύτητας αέρα για κάθε στρώμα προϊόντος.

Σχετικά με την ταχύτητα του αέρα, υπάρχουν προδιαγραφές που καθορίζουν τόσο την ελάχιστη όσο και την μέγιστη επιθυμητή τιμή. Η ελάχιστη ταχύτητα είναι σημαντική για να εξασφαλίζονται ευνοϊκές συνθήκες συναγωγής, ενώ η μέγιστη τιμή της ταχύτητας πρέπει να ελέγχεται για να αποφεύγονται οι τραυματισμοί των προϊόντων ή η αιώρησή τους. Η χωρητικότητα του ξηραντήριου, δηλαδή η ποσότητα νωπού προϊόντος που μπορεί να ξηραθεί ανά κύκλο λειτουργίας, υπολογίστηκε με βάση τη μέση φαινόμενη πυκνότητα των καρυδιών ποικιλίας Chandler, καθώς και τις διαμέτρους τους ($D = 36\text{mm}$), όπως αναφέρεται στην έρευνα των (Chang Chen, 2021). Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη τις διαστάσεις και το πλήθος των ραφιών, η συνολική χωρητικότητα ξήρανσης του ξηραντήριου ανά κύκλο ξήρανσης θα είναι περίπου 450 κιλά καρυδιών τοποθετημένα σε μια απλή στρώση.



Εικόνα 5.1 – Τρισδιάστατη εικόνα του θαλάμου ξήρανσης που προτάθηκε παραπάνω. (SketchUp 2021)



Εικόνα 5.2 – Πλάγια όψη του προτεινόμενου θαλάμου ξήρανσης. (AutoCad 2017)

5.3 Μοντελοποίηση λειτουργίας συμβατικού ξηραντήριου καρυδιών

5.3.1 Συνθήκες λειτουργίας ξηραντήριου

Στο πλαίσιο της ξηραντικής διεργασίας για το καρύδι, οι ερευνητικές μελέτες αναφέρουν μια ευρεία περιοχή θερμοκρασιών αέρα, η οποία καταγράφεται να διακυμαίνεται μεταξύ 40°C και 75°C, και επιπρόσθετα διαφοροποιούνται τις ταχύτητες αέρα που κυμαίνονται από 0.7 μέτρα ανά δευτερόλεπτο έως 1.4 μέτρα ανά δευτερόλεπτο για την εγκάρσια ροή, σύμφωνα με τις ερευνητικές εργασίες των (Chang Chen, 2021), (Chen, et al., 2019) και (Chen, et al., 2020). Βάσει των παραπάνω δεδομένων, και για μια παροχή αέρα της τάξης των 2500 κυβικών μέτρων ανά ώρα, υπολογίζεται ότι η ταχύτητα του αέρα που διέρχεται από κάθε τελάρο είναι περίπου 0.7 μέτρα ανά δευτερόλεπτο. Αναλυτικότερα, στην παρούσα διπλωματική, θα πραγματοποιηθεί υπολογιστική διερεύνηση των ενεργειακών μεγεθών για θερμοκρασίες ξήρανσης 43°C, 55°C, 65°C και 75°C για σταθερή παροχή και ταχύτητα αέρα.

5.3.2 Επιλογή μοντέλου ξήρανσης καρυδιού

Στον επιστημονικό τομέα της ξηραντικής τεχνολογίας, η επεξεργασία του καρυδιού μέσω της εφαρμογής θερμού αέρα αναδεικνύεται ως μια διαδικασία που εκτελείται σε μονά στρώματα, ένας τρόπος γνωστός ως "single layer drying". Καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, δεν παρατηρείται ένας ομοιόμορφος ή σταθερός ρυθμός απώλειας υγρασίας. Αντιθέτως, η σταδιακή μείωση του ρυθμού ξήρανσης υπογραμμίζει την κυριαρχία της διαδικασίας διάχυσης ως του βασικού μηχανισμού μεταφοράς υγρασίας από το εσωτερικό προς την εξωτερική επιφάνεια του φυτικού υλικού. Η διάχυση, επομένως, αποτελεί το κεντρικό στοιχείο στη διαδικασία της ξήρανσης. Συνεπώς για τον υπολογισμό της υγρασίας ισορροπίας θα χρησιμοποιηθεί το μοντέλο του Peleg, το οποίο θεωρείται και το καταλληλότερο για τα ποσοστά σε υγρασία στο προϊόν υπό ξήρανση. Η μαθηματική έκφραση του οποίου είναι η εξής:

$$X_e = K_1 a_w^{n_1} + K_2 a_w^{n_2}$$

Όπου K_1 και K_2 είναι συντελεστές εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία και έχουν υπολογιστεί και αναλυθεί πειραματικά από τους (Chen et al., 2020), (Chen et al., 2019).

Για την περιγραφή της κινητικής της ξήρανσης, η επιστημονική κοινότητα επικαλείται συχνά τον δεύτερο νόμο του Fick για την διάχυση. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει τον πειραματικό προσδιορισμό του συντελεστή διάχυσης, παρέχοντας μια θεμελιώδη κατανόηση της δυναμικής μεταφοράς υγρασίας. Επιπλέον, για την ακριβέστερη περιγραφή της ξηραντικής διαδικασίας, εφαρμόζονται και μοντέλα βασισμένα σε ημιεμπειρικές εξισώσεις. Τα μοντέλα αυτά απαιτούν επίσης τον πειραματικό προσδιορισμό των σχετικών συντελεστών ξήρανσης, διευκολύνοντας την εφαρμογή τους σε πρακτικές συνθήκες και επιτρέποντας τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας ξήρανσης με βάση αξιόπιστες προβλέψεις.

Συγκεκριμένα, το καταλληλότερο μοντέλο για την περιγραφή της ξήρανσης του καρυδιού είναι το μοντέλο προϊόντος σφαιρικής γεωμετρίας (εξίσωση 3.4):

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\pi^2 D_{ef} \frac{t}{r^2}\right)$$

Όπου οι συντελεστές διάχυσης για κάθε μια από τις θερμοκρασίες ανάλυσης έχουν προσδιοριστεί πειραματικά για τις θερμοκρασίες διερεύνησης και για τις παρόμοιες συνθήκες λειτουργίας από τους (Chen, et al., 2019) και δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Shell		Regression coefficients			
T (°C)	D _{eff,ave} (m ² /s)	A	B	C	D
43	1.51 × 10 ⁻⁹	2.6 × 10 ⁻⁷	-1.5 × 10 ⁻⁷	3.2 × 10 ⁻⁸	-8.8 × 10 ⁻¹⁰
55	2.14 × 10 ⁻⁹	3.6 × 10 ⁻⁷	-2.2 × 10 ⁻⁷	4.9 × 10 ⁻⁸	-1.2 × 10 ⁻⁹
65	2.90 × 10 ⁻⁹	5.3 × 10 ⁻⁷	-3.2 × 10 ⁻⁷	7.0 × 10 ⁻⁸	-1.9 × 10 ⁻⁹
75	9.28 × 10 ⁻⁹	7.7 × 10 ⁻⁷	-4.6 × 10 ⁻⁷	9.6 × 10 ⁻⁸	-2.9 × 10 ⁻⁹
Kernel		A	B	C	D
43	1.13 × 10 ⁻⁹	7.3 × 10 ⁻⁷	-3.5 × 10 ⁻⁷	6.0 × 10 ⁻⁸	-2.3 × 10 ⁻⁹
55	1.54 × 10 ⁻⁹	1.1 × 10 ⁻⁶	-5.4 × 10 ⁻⁷	8.9 × 10 ⁻⁸	-3.1 × 10 ⁻⁹
65	2.08 × 10 ⁻⁹	1.5 × 10 ⁻⁶	-6.9 × 10 ⁻⁷	1.1 × 10 ⁻⁷	-3.5 × 10 ⁻⁹
75	2.85 × 10 ⁻⁹	2.3 × 10 ⁻⁶	-9.4 × 10 ⁻⁶	1.5 × 10 ⁻⁷	-4.6 × 10 ⁻⁹

Πίνακας 5.1 – Πίνακας μέσων συντελεστών διάχυσης σε κέλυφος και ψίχα καρυδιού για διάφορες θερμοκρασίες. (Chen, et al., 2019)

Επίσης, Από τον ορισμό του λόγου υγρασίας σε συνδυασμό με την εξίσωση του Page προκύπτει η έκφραση για την περιεχόμενη περιεκτικότητα σε υγρασία ανά χρονικό βήμα:

$$MR = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} \Rightarrow X_t = MR(X_0 - X_e) + X_e \quad (5.1)$$

Τέλος, ένα ενδιαφέρον μέγεθος το οποίο θα μας δώσει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την αποδοτικότητα του ξηραντήριου είναι ο φθίνων, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ρυθμός ξήρανσης. Ο ρυθμός ξήρανσης δίνεται από την εξής εξίσωση:

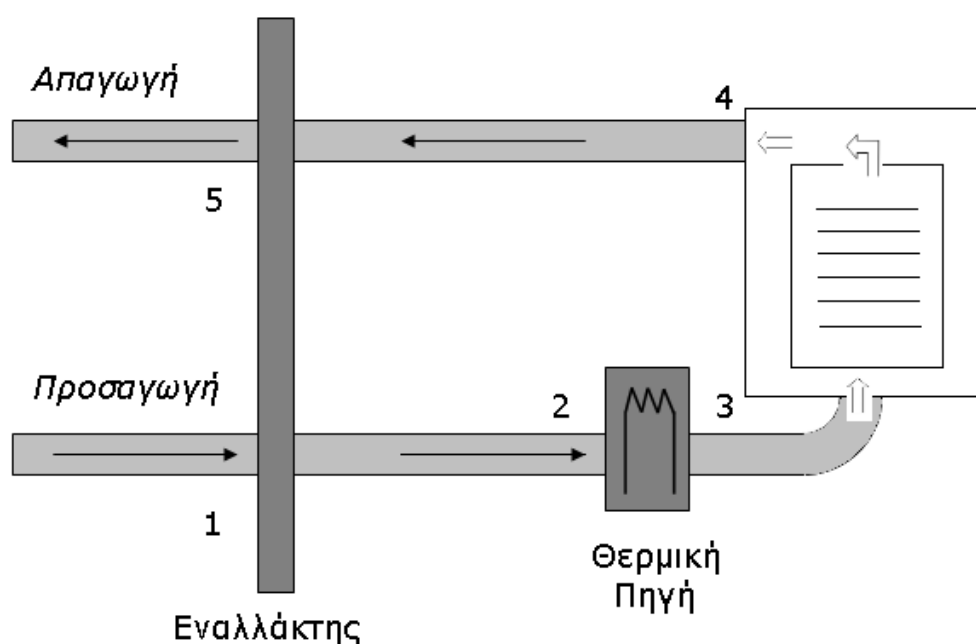
$$DR = \frac{X_0 - X_t}{t} \quad (5.2)$$

5.3.3 Περιγραφή διάταξης

Η αρχιτεκτονική ενός παραδοσιακού ξηραντήριου, όπως απεικονίζεται στο σχέδιο 5.1, διαρθρώνεται σε τρία βασικά υποσυστήματα, η συνεργασία των οποίων είναι καθοριστική για την επίτευξη της επιθυμητής αποτελεσματικότητας στη διαδικασία ξήρανσης. Το πρώτο

υποσύστημα αφορά τον θάλαμο ξήρανσης, ο οποίος λειτουργεί βάσει της αρχής της εγκάρσιας ροής, επιτρέποντας την ομοιόμορφη κατανομή του θερμαινόμενου αέρα στο εσωτερικό του. Ακολουθεί το δεύτερο υποσύστημα, το οποίο περιλαμβάνει τη θερμική πηγή, η οποία υπεύθυνη για την προσδιορισμό της απαραίτητης θερμοκρασίας στο ρεύμα αέρα προσαγωγής πριν αυτός εισέλθει στον θάλαμο ξήρανσης, διασφαλίζοντας έτσι την αποδοτική θερμική ενεργοποίηση της διαδικασίας ξήρανσης. Το τρίτο και τελευταίο υποσύστημα αποτελείται από έναν εναλλάκτη αέρα-αέρα, ο οποίος έχει ως κύριο στόχο την ανακύκλωση θερμότητας μεταξύ των ρευμάτων απαγωγής και προσαγωγής. Αυτός ο εναλλάκτης επιτυγχάνει την προθέρμανση του αέρα προσαγωγής με την ανάκτηση θερμότητας από το ρεύμα απαγωγής, προτού το προθερμασμένο αέριο ρεύμα διοχετευθεί προς την θερμική πηγή, βελτιστοποιώντας την ενεργειακή απόδοση του συστήματος ξήρανσης.

Η παραπάνω διατύπωση υπογραμμίζει την κρίσιμότητα της αρμονικής λειτουργίας των υποσυστημάτων στη συνολική απόδοση της διαδικασίας ξήρανσης, καθιστώντας την κατανόηση και την εφαρμογή των συγκεκριμένων μηχανισμών και διαδικασιών απαραίτητη για την επίτευξη της επιθυμητής θερμικής και ξηραντικής αποδοτικότητας.



Σχέδιο 5.1 – Διάταξη συμβατικού ξηραντηρίου.

5.3.4 Μοντελοποίηση λειτουργίας συμβατικού ξηραντήριου

Η ανάπτυξη ενός μοντέλου για τον προσομοιωτικό σχεδιασμό ενός ξηραντηρίου προϋποθέτει την εμπειριστατωμένη κατανόηση και την ακριβή περιγραφή των δυναμικών [73]

των κύριων υποσυστημάτων της συσκευής. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει την αναγνώριση και την εφαρμογή των κατάλληλων μοντέλων που διέπουν τη λειτουργία των επιμέρους μηχανισμών, τα οποία, με τη σειρά τους, ενσωματώνονται εντός ενός ενιαίου και συνολικού πλαισίου μοντελοποίησης, αντανακλώντας την αλληλεπίδρασή τους μέσα στην ολοκληρωμένη διαρθρωτική διάταξη του ξηραντηρίου.

1. Εναλλάκτης

Σε ό,τι αφορά τον εναλλάκτη θερμότητας του συστήματος, πραγματοποιήθηκε μια θεωρητική υπόθεση όπου προβλέπεται ότι οι θερμοχωρητικότητες των ρευμάτων παροχής και απορρόφησης είναι ισοδύναμες, ενώ ο συντελεστής απόδοσης του εναλλάκτη διατηρείται σε ένα σταθερό επίπεδο. Ο εν λόγω συντελεστής απόδοσης καθορίστηκε σε ποσοστό 0.85, μια τιμή που συμφωνεί με την αποδοτικότητα ενός συγκεκριμένου τύπου εμπορικά διαθέσιμου εναλλάκτη και έχει επικυρωθεί μέσω πειραματικών διαδικασιών, όπως αναφέρεται στις εργασίες των [Panaras, et al., 2010a]. Μέσω αυτής της υπόθεσης, είναι δυνατός ο υπολογισμός της θερμοκρασίας του αέρα ακριβώς πριν από την είσοδό του στη θερμαντική μονάδα, παρέχοντας μια σταθερή βάση για την ακριβή προσδιορισμό των λειτουργικών συνθηκών, όπως καταγράφεται στις ερευνητικές δημοσιεύσεις των [Kays & London, 1984].

$$\eta_{hx} = \frac{T_2 - T_1}{T_4 - T_1} \Rightarrow T_2 = T_1 + \eta_{hx}(T_4 - T_1) \quad (5.3)$$

Η θερμοκρασία T_5 του απορριπτόμενου (υγρού) αέρα προς το περιβάλλον μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$T_4 - T_5 = T_2 - T_1 \quad (5.4)$$

2. Θερμική ενεργειακή πηγή

Θεωρούμε ότι η θερμική πηγή διασφαλίζει την έξοδο του αέρα από το ξηραντήριο σε μια καθορισμένη θερμοκρασία (43,55,65 και 75 °C):

$$T_3 = ct \quad (5.5)$$

3. Θάλαμος ξήρανσης

Στην πλαίσιο της θερμοδυναμικής ανάλυσης ενός ξηραντήριου, όταν πραγματοποιούμε μια εκτίμηση βάσει του ενεργειακού ισοζυγίου εντός του θαλάμου ξήρανσης, μπορεί να εφαρμοστεί η υπόθεση αδιαβατικής διεργασίας, ήτοι μια διεργασία κατά την οποία δεν λαμβάνεται χώρα οποιαδήποτε ανταλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον. Υπό αυτή την προϋπόθεση, είναι δυνατόν να καταλήξουμε στον προσδιορισμό της μεταβολής της θερμοκρασίας του αέρα κατά την διάρκεια ενός διακριτού χρονικού διαστήματος, ως αποτέλεσμα της ενθαλπίας εξάτμισης του νερού που απομακρύνεται από το προϊόν κατά την διαδικασία ξήρανσης.

Η διαδικασία αυτή συνεπάγεται την ανάλυση της ενεργειακής απόδοσης του θαλάμου ξήρανσης, λαμβάνοντας υπόψη την ποσότητα της θερμότητας που απαιτείται για την εξάτμιση της υγρασίας από το υλικό. Η εξατμιστική διαδικασία προκαλεί μείωση στη θερμοκρασία του κυκλοφορόντος αέρα, δεδομένου ότι μέρος της θερμικής ενέργειας του αέρα καταναλώνεται για την ενθαλπία εξάτμισης. Η ποσοτικοποίηση της θερμοκρασιακής μεταβολής ανά χρονική περίοδο παρέχει κρίσιμα δεδομένα για την κατανόηση της αποδοτικότητας της ξηραντικής διαδικασίας και την βελτιστοποίηση των λειτουργικών παραμέτρων του ξηραντήριου. Συγκεκριμένα:

$$\dot{m}_w h_g = \dot{m}_{air} c_p \Delta T \Rightarrow \Delta T = \frac{\dot{m}_w h_g}{\dot{m}_{air} c_p} \quad (5.6)$$

Όπου, \dot{m}_{air} είναι η παροχή μάζας του αέρα, \dot{m}_w είναι η παροχή μάζας του νερού που εξατμίζεται, h_g είναι η ειδική ενθαλπία εξατμίσεως του κορεσμένου νερού, c_p είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα και ΔT είναι η θερμοκρασιακή πτώση του αέρα.

Οι θερμοφυσικές ιδιότητες των ρευστών, και ειδικότερα η πυκνότητα, η ειδική θερμοχωρητικότητα καθώς και η ενθαλπία εξατμίσεως του νερού, οι οποίες υπεισέρχονται στην παρούσα ανάλυση, υπολογίστηκαν σύμφωνα με γνωστές σχέσεις που παρατίθενται στην βιβλιογραφία [ASHRAE, 1996].

Η θερμοκρασία εξόδου από το ξηραντήριο υπολογίζεται ως εξής:

$$T_4 = T_3 - \Delta T \quad (5.7)$$

Όπου T_4 είναι η θερμοκρασία στην έξοδο του ξηραντήριου.

Η κατανάλωση ενέργειας κρίνεται ως ένας εκ των πλέον κρίσιμων δεικτών για την εκτίμηση της αποδοτικότητας ενός ξηραντήριου και αποτελεί βασικό κριτήριο σύγκρισης διαφόρων μοντέλων και τεχνολογικών προσεγγίσεων. Σε αυτό το πλαίσιο, ένα παράγοντας που προσελκύει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι η θερμική ισχύς, συμβολιζόμενη ως P_h , η οποία είναι απαραίτητη για την ανύψωση της θερμοκρασίας του ξηραντικού αέρα στα επιδιωκόμενα επίπεδα θερμοκρασίας. Αυτή η θερμική ισχύς υπολογίζεται με βάση την ακόλουθη σχετική σχέση:

$$P_h = \dot{m}_{air} c_p (T_3 - T_2) \quad (5.8)$$

Στη διερεύνηση της ενεργειακής αποδοτικότητας ενός ξηραντήριου, προτιμάται η χρήση της μετρικής της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας αντί για τον παραδοσιακό βαθμό απόδοσης. Η ειδική κατανάλωση ενέργειας, που προσδιορίζεται ως ο λόγος της ενέργειας που καταναλώνεται ανά μονάδα μάζας του νερού που απομακρύνεται από το προϊόν κατά την ξήρανση, αποτελεί έναν κρίσιμο δείκτη για την αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης της διαδικασίας. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει μια πιο λεπτομερή και ολοκληρωμένη κατανόηση της ενεργειακής συμπεριφοράς του ξηραντήριου, καθώς επικεντρώνεται στην

αποδοτικότητα μετατροπής της ενέργειας σε χρήσιμη ξήρανση. Η μεθοδολογία για τον υπολογισμό της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας επισημαίνεται στις εργασίες ερευνητών όπως οι (Chen, et al., 2020) ,παρέχοντας έναν αξιόπιστο τρόπο για την αξιολόγηση και σύγκριση της ενεργειακής αποδοτικότητας διαφόρων ξηραντήριων ή διατάξεων ξήρανσης.

Αυτός ο δείκτης ειδικής κατανάλωσης ενέργειας είναι ιδιαίτερα χρήσιμος για την ποσοτικοποίηση της ενεργειακής αποτελεσματικότητας της ξηραντικής διαδικασίας, προσδίδοντας στους ερευνητές και τους μηχανικούς ένα εργαλείο για την βελτίωση των τεχνολογικών προτύπων και την ανάπτυξη πιο αποδοτικών συστημάτων ξήρανσης. Η εφαρμογή αυτού του δείκτη διευκολύνει την σύγκριση μεταξύ διαφορετικών μεθόδων ξήρανσης και την επιλογή της πλέον κατάλληλης προσέγγισης με βάση τις ενεργειακές απαιτήσεις και την οικονομική σκοπιμότητα. Η εξίσωση είναι η εξής:

$$SEC = \frac{Q_{h,tot}}{m_{w,tot}} \quad (5.9)$$

Όπου, $m_{w,tot}$ είναι η συνολική μάζα νερού που αφαιρέθηκε από το προϊόν κατά την ξήρανση και $Q_{h,tot}$ είναι η συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε στον θερμαντήρα κατά την διάρκεια της ξήρανσης. Αναλυτικότερα, η συνολική αυτή ενέργεια υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$Q_{h,tot} = \dot{m}_{air} c_p (T_3 - T_2) \Delta t \quad (5.10)$$

Όπου Δt είναι το χρονικό βήμα της διεργασίας της ξήρανσης.

Για την ακριβή εκτίμηση των ενεργειακών δεικτών στο πλαίσιο λειτουργίας ενός ξηραντήριου, απαιτείται η προσδιορισμός των θερμοκρασιών σε συγκεκριμένα σημεία εντός της διάταξης. Αυτή η διαδικασία εμπλέκει την αλγεβρική επίλυση των εξισώσεων 5.3-5.6, με σκοπό την εύρεση των θερμοκρασιών στις επιθυμητές τοποθεσίες μέσα στο ξηραντήριο. Στη διαδικασία αυτή, η θερμοκρασία εισόδου, συμβολιζόμενη ως T_1 , θεωρείται γνωστή και οι T_3 είναι σταθερή, ενώ οι θερμοκρασίες T_2 , T_4 , T_5 και η διαφορά θερμοκρασίας ΔT παραμένουν αρχικά αγνώστου. Η διαδικασία επίλυσης των εξισώσεων πραγματοποιείται υιοθετώντας

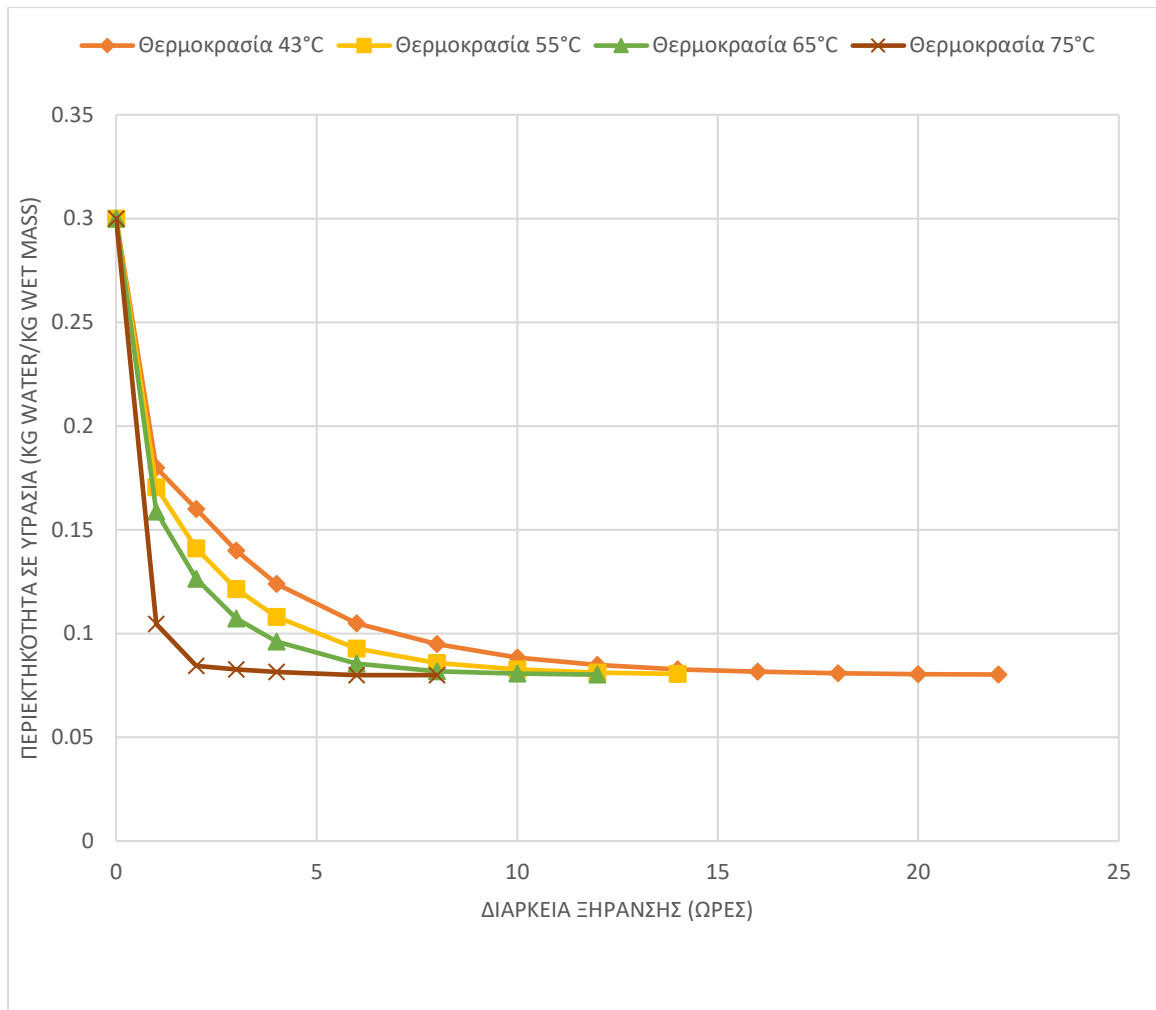
ένα χρονικό διάστημα Δt ίσο με 1000 δευτερόλεπτα για την προσαρμοστική επεξεργασία των υπολογισμών.

Η επιλογή αυτή του χρονικού βήματος Δt επιτρέπει την σταδιακή ανάλυση και την κατανόηση της δυναμικής των θερμοκρασιακών μεταβολών στο εσωτερικό του ξηραντήριου, παρέχοντας έτσι έναν πιο ολοκληρωμένο και ακριβή τρόπο για την αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς και της θερμοκρασιακής απόδοσης της διάταξης. Αυτή η προσέγγιση αποτελεί βασικό βήμα στην προσπάθεια βελτιστοποίησης των ενεργειακών απαιτήσεων και της αποδοτικότητας της διαδικασίας ξήρανσης στο σύνολό της.

5.4 Αποτελέσματα ανάλυσης

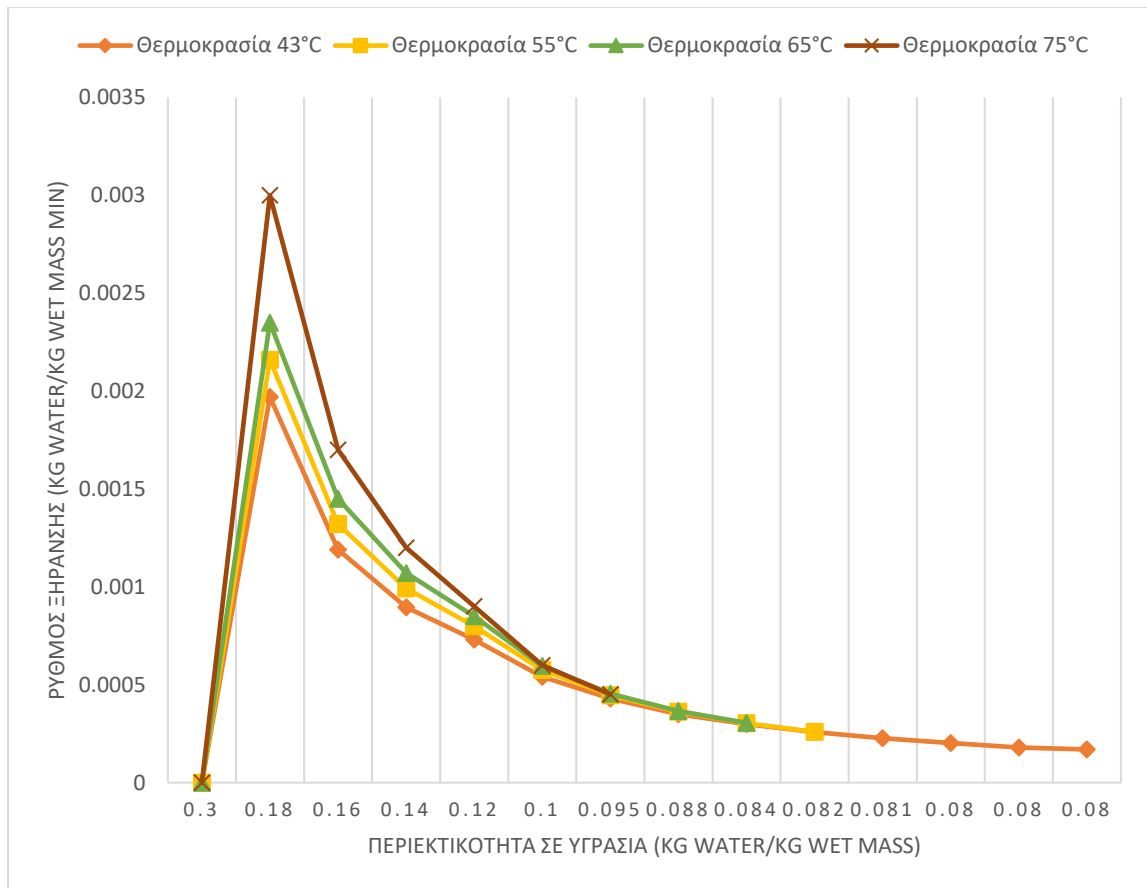
Τα αποτελέσματα που θα παραταθούν υπολογίστηκαν για συνθήκες περιβάλλοντος θερμοκρασίας 16°C και υγρασίας 9.7 g/kg. Οι συνθήκες αυτές επιλέχθηκαν για τον μήνα Οκτώβριο για την περιοχή του νομού Πιερίας σύμφωνα με το Τυπικό Μετεωρολογικό Έτος.

Η επιλογή του μήνα αυτού δεν είναι τυχαία, καθώς ο Οκτώβριος αποτελεί ένας από τους βασικούς μήνες συγκομιδής και επεξεργασίας του καρυδιού. Επιπλέον, η αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία του κελύφους του καρυδιού, σε υγρή βάση, λαμβάνεται ίση με 30%, ενώ η τελική τιμή είναι 8% καθιστώντας το προϊόν ασφαλές προς αποθήκευση αλλά και ανθεκτικό απέναντι σε ασθένειες και μούχλα (Chang Chen, 2021) (Chen et al., 2019) (Chen et al., 2020).



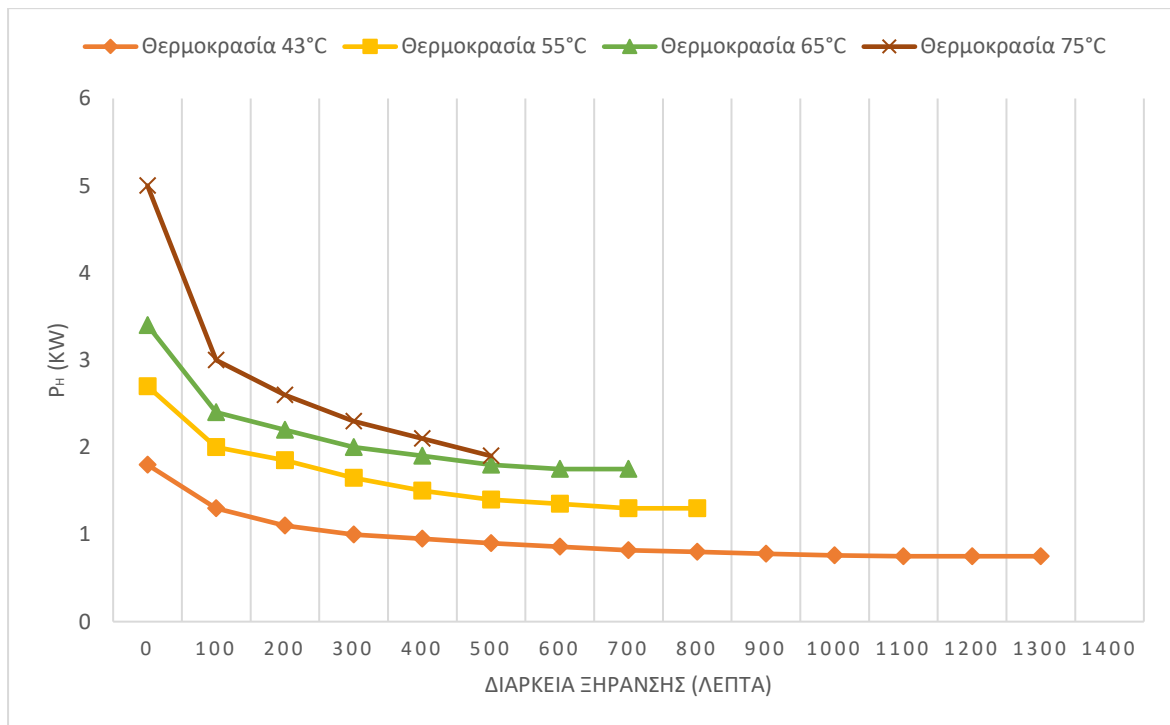
Σχήμα 5.1 – Καμπύλες ξήρανσης για διάφορες θερμοκρασίες αέρα ξήρανσης.

Στο σχ. 5.1 παρουσιάζεται η μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας του καρυδιού σε σχέση με το χρόνο για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας του αέρα ξήρανσης. Παρατηρούμε ότι αύξηση της θερμοκρασίας ξήρανσης επιφέρει σημαντική μείωση του συνολικού χρόνου ξήρανσης. Πιο συγκεκριμένα για θερμοκρασία ξήρανσης 45 °C ο χρόνος ξήρανσης υπολογίζεται στα 1320 min, για 55 °C στα 840 min, για 65°C στα 720 min και για θερμοκρασία 75°C στα 480 min.



Σχήμα 5.2 – Καμπύλες ρυθμού ξήρανσης σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα σε υγρασία του καρυδιού κατά την διεργασία της ξήρανσης.

Στο σχήμα 5.2 παρουσιάζεται η μεταβολή του ρυθμού ξήρανσης εν συναρτήσει της περιεκτικότητας της υγρασίας στο κέλυφος του καρυδιού κατά τη διεργασία της ξήρανσης. Παρατηρούμε ότι ο ρυθμός ξήρανσης παρουσιάζει έντονη αύξηση στα πρώτα στάδια της ξήρανσης μέχρι να αφαιρεθεί σχεδόν η μισή ποσότητα υγρασίας από το προϊόν. Στα μεταγενέστερα στάδια και για την πλειοψηφία της διάρκειας της ξήρανσης, ο ρυθμός παρουσιάζει μια φθίνουσα πορεία μέχρι το σημείο επίτευξης του επιθυμητού ποσοστού υγρασίας 8%. Τα δεδομένα αυτά συνάδουν με την βιβλιογραφία όπως έχει υπολογιστεί και πειραματικά από τους (Chen, et al., 2020).

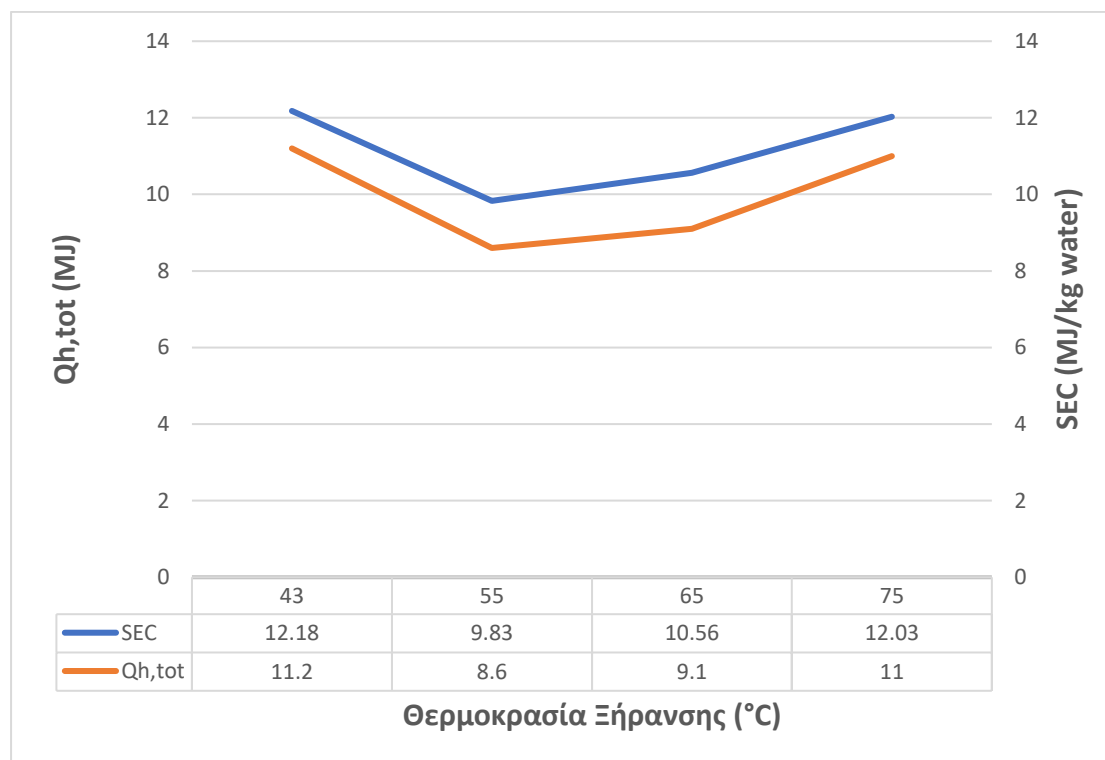


Σχήμα 5.3 - Μεταβολή της απαιτούμενης ισχύος κατά την διάρκεια της ξήρανσης για διαφορετικές θερμοκρασίες ξήρανσης

Βάσει της ανάλυσης του διαγράμματος 5.6, διαπιστώνουμε ότι η ζήτηση για θερμική ισχύ (P_h) κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ξήρανσης κλιμακώνεται ανάλογα με την αύξηση της θερμοκρασίας ξήρανσης. Καθώς η θερμοκρασία ξήρανσης ανεβαίνει, αυξάνεται και η απαιτούμενη θερμοκρασία του εξερχόμενου αέρα από την θερμική μονάδα. Αν και η χρήση ενός εναλλάκτη για την ανάκτηση θερμότητας συμβάλλει στη μείωση της συνολικής θερμικής κατανάλωσης, αυτή η εξοικονόμηση δεν είναι αρκετή για να εξισορροπήσει τις αυξημένες ενεργειακές ανάγκες που επιφέρει η αύξηση της θερμοκρασίας ξήρανσης.

Επιπλέον, αναλύοντας την τάση της θερμικής ισχύος που απαιτείται σε σχέση με την πάροδο του χρόνου, μπορούμε να παρατηρήσουμε τα εξής: η θερμοκρασία εξόδου του αέρα από τον θάλαμο ξήρανσης (T_4) επηρεάζεται από την ποσότητα του νερού που απορροφάται. Καθώς ο αέρας προσλαμβάνει θερμότητα ισοδύναμη με την ενθαλπία εξάτμισης της συγκεκριμένης ποσότητας νερού, παρατηρείται μείωση της ποσότητας του νερού που αφαιρείται με τον χρόνο, προκαλώντας αντίστοιχη μείωση της θερμοκρασιακής διαφοράς του αέρα κατά τη διέλευσή του από τον θάλαμο ξήρανσης. Αυτό συνεπάγεται μεταβολή της θερμοκρασίας εξόδου του αέρα από το σύστημα απαγωγής (T_2), με αποτέλεσμα την προοδευτική μείωση

της απαιτούμενης θερμικής ισχύος (P_h) με την πάροδο του χρόνου, όπως αποτυπώνεται στο διάγραμμα 5.6.

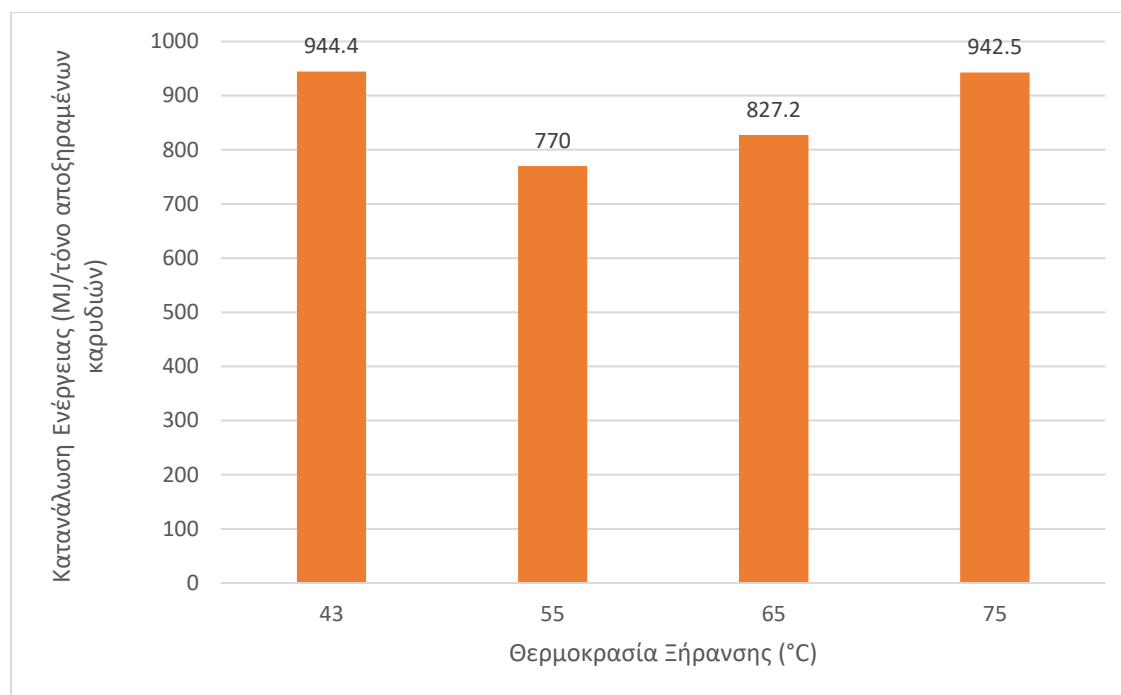


Σχήμα 5.4 - Συνολική κατανάλωση ενέργειας και ειδική κατανάλωση ενέργειας για διαφορετικές θερμοκρασίες του αέρα ξήρανσης.

Βάσει της ανάλυσης του διαγράμματος 5.4 παρατηρούμε ότι αν και η θερμοκρασία αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την αύξηση της απαιτούμενης θερμικής ισχύος στη διαδικασία ξήρανσης, ένας σημαντικός παράγοντας που μετριάζει αυτή την ανάγκη είναι η επίτευξη ταχύτερης διαδικασίας ξήρανσης. Η ταχύτητα αυτή, παρά την υψηλότερη θερμοκρασία, συμβάλλει στη συνολική μείωση της ενέργειας που καταναλώνεται για την ολοκλήρωση της ξήρανσης. Ωστόσο, παρατηρείται ένα όριο στους 75°C, όπου και η απαιτούμενη θερμική ισχύς, αν και σε συντομότερο χρονικό διάστημα, πλησιάζει αυτή των 43°C. Ωσαύτως, από ένα σημείο και έπειτα, οι υψηλές θερμοκρασιακές απαιτήσεις, τείνουν να έχουν την αντίθετη δράση στην εξοικονόμηση της ενέργειας. Συμπερασματικά, η επιλογή των κατάλληλων συνθηκών ξήρανσης πρόκειται για μία διερεύνηση συνδυαστικού χαρακτήρα, έτσι ώστε να βρεθεί η χρυσή τομή ανάμεσα στην θερμοκρασία αέρα ξήρανσης και χρόνου ξήρανσης. Αυτή η δυναμική είναι επίσης εμφανής στην ειδική κατανάλωση ενέργειας, επισημαίνοντας ένα ενδιαφέρον φαινόμενο: παρά τις θερμοκρασιακές αυξήσεις, η ποσότητα του νερού που

εξάγεται από το προϊόν διατηρείται σταθερή, υποδηλώνοντας ότι η απομάκρυνση του νερού δεν επηρεάζεται από τις μεταβολές στη θερμοκρασία.

Συνοπτικά, γνωρίζοντας την κατανάλωση ενέργειας για την αφαίρεση ενός κιλού υγρασίας από τα καρύδια, είναι πολύ εύκολο και χρήσιμο να υπολογιστεί η απαραίτητη ενέργεια που χρειάζεται ένας τόνος αποξηραμένου καρυδιού. Τα αποτελέσματα αυτά θα δοθούν στον παρακάτω πίνακα για κάθε θερμοκρασία που μελετήθηκε.



Σχήμα 5.5 – Απαιτούμενη ενέργεια για την απόκτηση ενός τόνου αποξηραμένου καρυδιού για τις υπό μελέτη θερμοκρασίες.

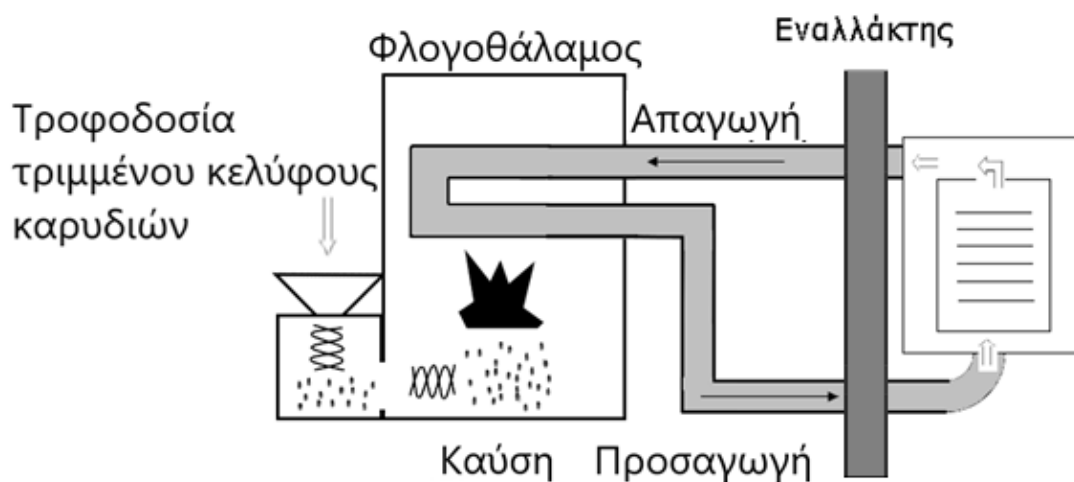
Τα αποτελέσματα αυτά συνάδουν με την βιβλιογραφία, κατά την οποία παρουσιάζεται ένα εύρος από 1371 έως 4230 MJ για κάθε τόνο αποξηραμένου καρυδιού (Chen et al., 2020) και [Baarda et al., 2017]. Τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής αγγίζουν το άνω όριο την απαιτούμενης ενέργειας, γεγονός που δεν είναι ανησυχητικό καθώς ο σχεδιασμός του θαλάμου δεν πραγματοποιήθηκε για την βελτιστοποίηση της διεργασίας της ξήρανσης. Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα της κάθε θερμοκρασίας βρίσκονται εντός του βιβλιογραφικού αυτού εύρους, καθιστώντας τον θάλαμο ξήρανσης ως, σχεδιαστικά αποδοτικό.

5.5 Διερεύνηση λειτουργίας ξηραντήριου καρυδιού με αερολέβητα βιομάζας

5.5.1 Περιγραφή ξηραντήριου

Ο ξηραντήρας καρυδιών που λειτουργεί με αερολέβητα βιομάζας αποτελεί μια καινοτόμο και περιβαλλοντικά φιλική λύση για την αποξήρανση καρυδιών, με σκοπό την προετοιμασία τους για αποθήκευση και πώληση. Αυτή η τεχνολογία εκμεταλλεύεται την ενέργεια που παράγεται από την καύση βιομάζας, όπως ξύλο, αγροτικά απόβλητα και άλλα βιολογικά υλικά, για την παραγωγή θερμότητας.

Ο αερολέβητας βιομάζας λειτουργεί ως η κεντρική μονάδα θέρμανσης στο σύστημα ξήρανσης, όπου η βιομάζα καίγεται σε έναν ειδικά σχεδιασμένο θάλαμο καύσης. Η διαδικασία καύσης της βιομάζας παράγει θερμότητα, η οποία μεταφέρεται στον αέρα μέσω ενός συστήματος εναλλαγής θερμότητας. Αυτό το σύστημα είναι ουσιαστικά ένας μηχανισμός που επιτρέπει την αποτελεσματική μεταφορά της θερμικής ενέργειας από το ζεστό αέριο που παράγεται κατά την καύση στον αέρα που χρησιμοποιείται για την ξήρανση, χωρίς την άμεση επαφή μεταξύ τους. Αυτό εξασφαλίζει ότι ο θερμός αέρας που εισέρχεται στον θάλαμο ξήρανσης είναι καθαρός και κατάλληλος για την επεξεργασία των καρυδιών, παρέχοντας έναν αποδοτικό τρόπο για την ελαχιστοποίηση της υγρασίας τους.



Σχέδιο 5.2 – Διάταξη ξηραντήριου με χρήση αερολέβητα βιομάζας.

Στον θάλαμο ξήρανσης, τα καρύδια τοποθετούνται σε ειδικά διαμορφωμένα ράφια ή καλάθια που επιτρέπουν την ομοιόμορφη κατανομή του θερμού αέρα γύρω και μέσα από τα καρύδια, όπως και αναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο 5.2. Η σταδιακή θέρμανση και η ροή του

αέρα αφαιρούν την υγρασία από τα καρύδια, μειώνοντας την περιεκτικότητά τους σε νερό στο επιθυμητό επίπεδο.

Η διαδικασία ξήρανσης ελέγχεται μέσω ενός συστήματος διαχείρισης που ρυθμίζει τη θερμοκρασία, τη ροή του αέρα και τη διάρκεια ξήρανσης. Αυτό επιτρέπει την προσαρμογή της διαδικασίας ανάλογα με το είδος και την αρχική υγρασία των καρυδιών, εξασφαλίζοντας την ιδανική ποιότητα του τελικού προϊόντος.

Η χρήση αερολέβητα βιομάζας για την ξήρανση καρυδιών προσφέρει σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη, καθώς χρησιμοποιεί ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, μειώνοντας την εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα και τις σχετικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου. Επιπλέον, η αξιοποίηση της βιομάζας ως καύσιμο μπορεί να βοηθήσει στη μείωση των αγροτικών αποβλήτων, προσφέροντας μια βιώσιμη εναλλακτική για την ενεργειακή διαχείριση στην αγροτική οικονομία.

5.5.2 Κέλυφος καρυδιού ως βιοκαύσιμο

Η χρήση κελύφους καρυδιού ως βιοκαύσιμο για τη λειτουργία αερολέβητων βιομάζας αποτελεί μία από τις πιο πρωτοποριακές και περιβαλλοντικά βιώσιμες προσεγγίσεις στη διαχείριση αγροτικών αποβλήτων και στην παραγωγή ενέργειας. Αυτή η πρακτική ενσαρκώνει την ιδέα της κυκλικής οικονομίας, καθώς τα υποπροϊόντα της γεωργικής παραγωγής μετατρέπονται σε πολύτιμη ενεργειακή πηγή. Το κέλυφος καρυδιού, όταν καίγεται σε αερολέβητες βιομάζας, παράγει μια σημαντική ποσότητα θερμότητας. Η διαδικασία καύσης είναι αποδοτική λόγω της υψηλής θερμιδικής αξίας του κελύφους, καθιστώντας το ένα εξαιρετικά προτιμώμενο βιοκαύσιμο. Η θερμική ενέργεια που παράγεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση θαλάμων ξήρανσης, παρέχοντας τον απαιτούμενο θερμό αέρα για την αποξήρανση καρυδιών ή άλλων γεωργικών προϊόντων. Η εκμετάλλευση του κελύφους καρυδιού ως βιοκαυσίμου συμβάλλει στη μείωση των αγροτικών αποβλήτων και στην ανακύκλωση του άνθρακα. Αντί για την απόρριψη των κελυφών ως απορρίμματα, η καύση τους για την παραγωγή ενέργειας σημαίνει ότι τα υλικά αυτά επιστρέφουν στον κύκλο της ζωής με έναν χρήσιμο και βιώσιμο τρόπο. Επιπλέον, η χρήση βιοκαυσίμων μπορεί να μειώσει τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου συγκρινόμενη με τα ορυκτά καύσιμα, καθώς το αέριο διοξείδιο του άνθρακα που απελευθερώνεται κατά την καύση θεωρείται ότι αναπληρώνεται από τον άνθρακα που απορροφάται από τα φυτά κατά τη διάρκεια της ανάπτυξής τους.

Η κοκκοποίηση του κελύφους του καρυδιού αποτελεί μια κρίσιμη διαδικασία για την αποδοτική καύση του σε αερολέβητες βιομάζας, βελτιστοποιώντας την ενεργειακή απόδοση και την περιβαλλοντική βιωσιμότητα της εκμετάλλευσης των γεωργικών αποβλήτων. Η διαδικασία αυτή μετατρέπει τα συμπαγή κελύφη σε μικρότερους, ομοιογενείς κόκκους, επιτρέποντας την πιο ομοιόμορφη και ελεγχόμενη καύση. Η κοκκοποίηση αυξάνει την επιφάνεια επαφής του καυσίμου με τον αέρα, διευκολύνοντας την ταχύτερη και πληρέστερη καύση. Αυτό οδηγεί σε μια αυξημένη θερμιδική απόδοση, καθώς και στην μείωση των απορριπτόμενων αερίων και της παραγωγής στερεών αποβλήτων, όπως τέφρα. Κόκκοι



Εικόνα 5.3 – Μικρός μύλος πελετών. (fandapelletmachine.com, χ.χ.)

ομοιογενούς μεγέθους επιτρέπουν μια πιο ομοιόμορφη κατανομή του αέρα και της θερμότητας στον καυστήρα, αποτρέποντας τα φαινόμενα υπερθέρμανσης ή ανεπαρκούς καύσης. Αυτό συμβάλλει στην βελτίωση της αποδοτικότητας και την ελαχιστοποίηση των εκπομπών επιβλαβών ουσιών. Οι κόκκοι κελύφους καρυδιού είναι ευκολότεροι στην αποθήκευση και τη μεταφορά σε σύγκριση με τα ακατέργαστα κελύφη. Η κοκκοποίηση μειώνει τον όγκο και βελτιώνει τη σταθερότητα του προϊόντος, επιτρέποντας την πιο αποδοτική διαχείριση του ενεργειακού υλικού. Η κοκκοποίηση του κελύφους του καρυδιού μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση μύλων αγροτικών αποβλήτων όπως ο εικονιζόμενος παρακάτω.

Όπως αναφέρθηκε στο 4^ο κεφάλαιο, η μετρούμενη και ανώτερη θερμογόνο δύναμη του κελύφους του καρυδιού είναι $GHV = 16,9345 \text{ MJ/kg}$ και $HHVd = 18,6619 \text{ MJ/kg}$ αντίστοιχα. Λαμβάνοντας υπόψη την μετατροπή του 1 MJ/kg σε $0,27 \text{ kWh/kg}$, διαπιστώνουμε ότι η ενεργειακή αξία του κελύφους καρυδιού ανέρχεται σε $5,1839 \text{ kWh/kg}$. Αυτό σημαίνει ότι 1 kg κελύφους καρυδιού αποδίδει $5,1839 \text{ kWh}$ θερμικής ισχύς.

Πρόσθετα, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η διαθεσιμότητα του κελύφους καρυδιού προϋποθέτει έναν κύκλο επεξεργασίας του καρυδιού. Συγκεκριμένα, μέσω της διαδικασίας σπασίματος, συγκεντρώνεται το κέλυφος, το οποίο στη συνέχεια κοκκοποιείται και αποθηκεύεται για να χρησιμοποιηθεί ως βιοκαύσιμο στην επόμενη περίοδο ξήρανσης. Η βιβλιογραφία (Sürmen & Demirbas, 2003) δίνει έναν καταμερισμό βάρους μεταξύ κελύφους και ψίχας του καρυδιού σε ποσοστό 67% για το κέλυφος και 33% για την ψίχα. Ωστόσο, σύμφωνα με την πλειοψηφία των φυτρώριων και ειδικότερα για την ποικιλία Chandler, η οποία αποτελεί το επίκεντρο της παρούσας εργασίας, το ποσοστό αυτό εκτιμάται σε περίπου 50% κέλυφος και 50% ψίχα. Η ανάλυση που ακολουθεί θα λάβει υπόψη και τα δύο ποσοστά, τόσο το βιβλιογραφικό όσο και το εμπειρικό, για τη διενέργεια συγκρίσεων και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

5.6 Σύγκριση των διατάξεων ξηραντήριων

Στα πλαίσια της ανάλυσης των δύο συστημάτων ξήρανσης που έχουν υποβληθεί σε εξέταση, η πρωταρχική διαφοροποίηση αναφέρεται στην επιλογή της ενεργειακής πηγής. Αυτό σημαίνει ότι οι υπόλοιπες παράμετροι που επηρεάζουν τη διαδικασία ξήρανσης (όπως οι διαστάσεις και η μορφολογία του θαλάμου ξήρανσης, οι συνθήκες εισαγωγής αέρα, η θερμοκρασία και η υγρασία του περιβάλλοντος χώρου και άλλες σχετικές μεταβλητές) διατηρούνται σταθερές μεταξύ των δύο συστημάτων. Αυτό επιτρέπει την καθαρή σύγκριση των ενεργειακών απαιτήσεων κάθε συστήματος, βασιζόμενη αποκλειστικά στην επιλογή του καυσίμου.

Για την ακριβή εκτίμηση και σύγκριση της ενεργειακής αποδοτικότητας των δύο διατάξεων, θα ληφθεί ως βασικό κριτήριο η ποσότητα της ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή ενός τόνου αποξηραμένων καρυδιών. Σε αυτό το πλαίσιο, η ποσότητα του κελύφους καρυδιού που θα χρησιμοποιηθεί ως βιοκαύσιμο στον αερολέβητα βιομάζας θα προσδιοριστεί είτε σε $w_{50\%} = 500$ κιλά (αντιστοιχούν στο 50% του συνολικού βάρους, σύμφωνα με εμπειρικές δεδομένα) είτε σε $w_{67\%} = 670$ κιλά (σύμφωνα με το 67% του συνολικού βάρους, βάσει βιβλιογραφικών αναφορών). Η επιλογή ανάμεσα σε αυτές τις δύο ποσότητες αντικατοπτρίζει την ευρύτητα των πιθανών σεναρίων που μπορεί να αντιμετωπίσει ένας παραγωγός καρυδιών, επιτρέποντας μια πιο εμπεριστατωμένη και πολύπλευρη ανάλυση των ενεργειακών δυναμικών της κάθε επιλογής καυσίμου.

Συνεπώς, η ενέργεια που προσφέρεται από αυτές τις ποσότητες κελυφών καρυδιού, υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψη:

- Τη θερμική ισχύ του κελύφους.
- Τον βαθμό απόδοσης του αερολέβητα βιομάζας, ο οποίος βρίσκεται από 90%-94% στο εμπόριο.

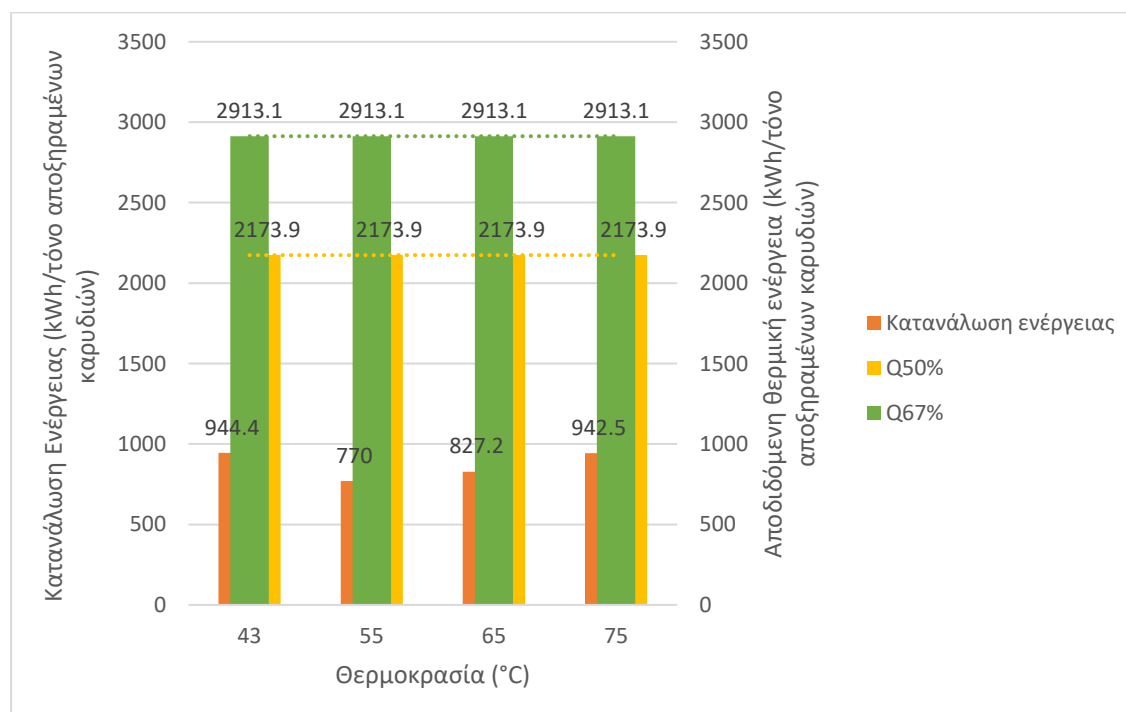
Αναλυτικότερα, χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση:

$$m = \frac{1}{(\text{Ηυκελ}\times\eta)} \quad (5.11)$$

Υπολογίζεται ότι για κάθε kWh θέρμανσης του αέρα ξήρανσης για μέσω του αερολέβητα βιομάζας, απαιτείται 0.23 kg κελύφους καρυδιού. Εν συνεχεία, για ποσότητες κελύφους καρυδιού $w_{50\%} = 500$ και $w_{67\%} = 670$ κιλά, η αποδιδόμενη θερμική ενέργεια, κατά αντιστοιχία, είναι :

$$Q_{50} = 2173.9 \text{ kWh}$$

$$Q_{67} = 2913.1 \text{ kWh}$$



Σχήμα 5.6 – Σύγκριση αποδιδόμενης με απαιτούμενης ενέργειας για την ξήρανση ενός τόνου καρυδιών.

Από το σχήμα 5.6 γίνεται προφανές πως η ενέργεια που λαμβάνουμε από την καύση των κελυφών καρυδιού που λαμβάνουμε από την ξήρανση και επερχόμενη επεξεργασία ενός τόνου καρυδιών, υπερκαλύπτει την ενεργειακές απαιτήσεις του συμβατικού ξηραντήριου, προσφέροντας και επιπλέον κύκλους ξήρανσης. Τα δεδομένα αυτά δίνονται με μορφή πίνακα παρακάτω:

Αποδιδόμενη ενέργεια	Κύκλοι ξήρανσης στους 43°C	Κύκλοι ξήρανσης στους 55°C	Κύκλοι ξήρανσης στους 65°C	Κύκλοι ξήρανσης στους 75°C
Q _{50%}	2.3	2.8	2.6	2.3
Q _{67%}	3.1	3.8	3.5	3.1

Πίνακας 5.2 – Επιπλέον κύκλοι ξήρανσης και συνεπώς τόνοι αποξηραμένων καρυδιών για αποδιδόμενη ενέργεια ανά τόνο αποξηραμένων καρυδιών.

Εν κατακλείδι, ένα παραδοσιακό σύστημα ξήρανσης ενδέχεται να εξαρτάται από την χρήση συμβατικών ενεργειακών πηγών όπως το πετρέλαιο θέρμανσης, το υγραέριο και την ηλεκτρική ενέργεια, ή ακόμη και ενός συνδυασμού τους για την θέρμανση και λειτουργία του. Παρακάτω, θα παρουσιαστεί αναλυτικά ένας πίνακας που θα επισημαίνει τα σχετικά κόστη παραγωγής ενός τόνου αποξηραμένων καρυδιών, βάσει των εξεταζόμενων θερμοκρασιών για κάθε διαθέσιμη ενεργειακή πηγή. Επισημαίνεται ότι, στην περίπτωση αξιοποίησης ενός αερολέβητα βιομάζας, τα κόστη που θα αναγραφούν στον πίνακα αντικατοπτρίζουν τα οικονομικά οφέλη ή τα κέρδη που προκύπτουν από τη χρήση αυτής της βιώσιμης ενεργειακής επιλογής, υπογραμμίζοντας την οικονομική αποδοτικότητα της εναλλακτικής χρήσης βιομάζας σε σύγκριση με τις παραδοσιακές ενεργειακές πηγές.

Ενεργειακή πηγή	Ξήρανση στους 43°C	Ξήρανση στους 55°C	Ξήρανση στους 65°C	Ξήρανση στους 75°C
Πετρέλαιο (0.16 €/kWh)	151.1	123.4	132.3	150.8
Υγραέριο (0.078 €/kWh)	72.7	59.3	63.7	72.6
Ρεύμα (0.15€/kWh)	141.7	115.5	124.1	141.4

Πίνακας 5.3 – Κόστη παραγωγής ενός τόνου αποξηραμένου καρυδιού ανά ενεργειακή πηγή για κάθε θερμοκρασία ξήρανσης που μελετήθηκε.

Κεφάλαιο 6 : Συμπεράσματα

Η εφαρμογή τεχνολογίας αερολέβητα βιομάζας με κελύφη καρυδιών για την ξήρανση καρυδιών συγκρινόμενη με τη χρήση ενός συμβατικού ξηραντήριου, που λειτουργεί με παραδοσιακές ενεργειακές πηγές όπως το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο, ή την ηλεκτρική ενέργεια, αναδεικνύει σημαντικά πλεονεκτήματα υπό το πρίσμα της βιωσιμότητας, της οικονομικής αποδοτικότητας και της ενεργειακής απόδοσης.

Η χρήση αερολέβητα βιομάζας με κελύφη καρυδιών μειώνει σημαντικά την εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα, προσφέροντας μια πιο βιώσιμη λύση. Η καύση βιομάζας είναι μία κυκλική διαδικασία, όπου το διοξείδιο του άνθρακα που εκλύεται κατά την καύση μπορεί να απορροφηθεί από τα φυτά, συμβάλλοντας στη μείωση του αντίκτυπου στο περιβάλλον σε σύγκριση με τις εκπομπές των ορυκτών καυσίμων.

Η ανακύκλωση κελύφους καρυδιού ως καυσίμου μειώνει το κόστος της ενέργειας για τους παραγωγούς καρυδιών, καθώς αξιοποιείται ένα υποπροϊόν που θα μπορούσε να θεωρηθεί απόβλητο. Επιπλέον, η αυτονομία που προσφέρει η χρήση τοπικά διαθέσιμων βιοκαυσίμων μπορεί να αποφέρει σημαντικά οικονομικά οφέλη, μειώνοντας την ανάγκη για αγορά ενέργειας από εξωτερικούς προμηθευτές. Συγκεκριμένα, όπως υπολογίστηκε και στην παρούσα διπλωματική εργασία, πολλαπλασιάζονται οι κύκλοι ξήρανσης από 2.3 έως και 3.8 φορές και μειώνονται τα κόστη από 59.3€ έως και 151.1€ ανά τόνο αποξηραμένων καρυδιών, αναλόγως τις συνθήκες ξήρανσης και της ενεργειακής πηγής.

Ο αερολέβητας βιομάζας, λόγω της υψηλής θερμογόνου δύναμης του κελύφους καρυδιού, παρέχει υψηλή ενεργειακή απόδοση. Η κοκκοποίηση και ομογενοποίηση του καυσίμου βελτιστοποιούν την καύση, επιτρέποντας την μέγιστη εκμετάλλευση της παραγόμενης θερμότητας για την ξήρανση των καρυδιών.

Συνολικά, η χρήση αερολέβητα βιομάζας με κελύφη καρυδιών για την ξήρανση καρυδιών προσφέρει μια εναλλακτική που υπερτερεί των συμβατικών μεθόδων ξήρανσης σε πολλά επίπεδα. Η βιωσιμότητα, η οικονομική αποδοτικότητα και η ενεργειακή απόδοση είναι κρίσιμοι παράγοντες που καθιστούν την τεχνολογία αυτή ιδανική για τον μοντέρνο αγροτικό τομέα από μικρούς έως και μεγάλους καλλιεργητές. Η προσέγγιση αυτή όχι μόνο μειώνει την εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα αλλά και ενθαρρύνει την ανάπτυξη κλειστών κυκλωμάτων παραγωγής και ενεργειακής αξιοποίησης, προωθώντας την αειφορία και την οικονομική ανθεκτικότητα στην παραγωγή καρυδιών.

Βιβλιογραφία

- Akpinar, K. & -E., 2006. Mathematical modelling of thin layer drying process under open sun of some aromatic plants..
- Al-Muhtaseb, et al., 2002. Moisture sorption isotherm characteristics of food products: a review.
- ANDRADE, D., M., R. L. & C., C. E. P., 2011. MODELS OF SORPTION ISOTHERMS FOR FOOD: USES AND LIMITATIONS.
- ASHRAE, 1996. Psychrometrics: Theory and Practice.
- Atungulu, G. & Pan, Z., 2012. Development of energy efficient dehulling and drying methods for walnuts..
- Baarda, R., Bergman, S., Gonel, G. & Kornbluth, D. K., 2017. Energy Analysis of Walnut Production in California.
- Barresi, A. A., Rasetto, V. & Marchisio, D. L., 2018. Use of computational fluid dynamics for improving freeze-dryers design and process understanding. Part 1: Modelling the lyophilisation chamber.
- Belessiotis, V. & Delyannis, E., 2011. Solar drying.
- Berg, C. v. d. & Bruin, S., 1981. WATER ACTIVITY AND ITS ESTIMATION IN FOOD SYSTEMS: THEORETICAL ASPECTS.
- Blahovec, J. & Yanniotis, S., 2009. *Modified classification of sorption isotherms.*
- Chang Chen, Z. P., 2021. Heat and moisture transfer studies on walnuts during hot air drying in a fixed-bed column dryer..
- Chen, C. et al., 2020. *Effect of step-down temperature drying on energy consumption and product quality of walnuts..*
- Chen, C. et al., 2019. *Effective moisture diffusivity and drying simulation of walnuts under hot air.*
- Chhabra, N., Arora, M., Garg, D. & Samota, M. K., 2023. *Spray freeze drying - A synergistic drying technology and its applications in the food industry to preserve bioactive compounds.*
- Cranck & J., 1975. The mathematics of diffusion.
- Davis, L. et al., 2007. The effects of high walnut and cashew nut diets on the antioxidant status of subjects with metabolic syndrome..
- Fu, Y., Dai, L. & Yang, B., 2005. Microwave finish drying of (tapioca) starch pearls.
- Kader, A., 2002. Post-Harvest Technology of Horticultural Crops..
- Kane, E., Ahmet, S. & Kouhila, M., 2009. Evaluation of drying parameters and sorption isotherms of mint leaves..

- Karathanos, V. & Belessiotis, V., 1997. *Sun and artificial air drying kinetics of some agricultural products*.
- Kays, W. & London, A., 1984. *Compact Heat Exchangers* (3rd ed.)..
- Khiri, και συν., 2013. Size and moisture distribution characteristics of walnuts and their components..
- Khiri, R. et al., 2012. Characterization of physical and aerodynamic properties of walnuts..
- Khiri, R. και συν., 2014b. Moisture-dependent color characteristics of walnuts..
- Khiri, R., Z., P., Atungulu, G. & Thompson, J., 2014a. Characterization of physical and aerodynamic.
- Labuza & T.P., 1968. *Sorption phenomena in foods*..
- Lewis, 1921. *The rate of drying of solid materials*..
- Loesecke, H. W. v., 1955. *Drying and Dehydration of Foods*. s.l.:s.n.
- Lopez, A., Iguaz, A., Esnoz, A. & Virseda, P., 2000. Thin-layer drying behaviour of vegetable wastes from wholesale market.
- Lowe, E., Rockland, L. & Yanase, K., 1961. *Studies on English walnuts, Juglans regia*..
- Martin-Santos, και συν., 2012. Thermodynamic properties of moisture adsorption of whole wheat flour. Calculation of net isosteric heat..
- Panaras, G., Mathioulakis, E., Belessiotis, V. & Kyriakis, N., 2010a. Theoretical and experimental investigation of a desiccant air-conditioning system..
- Pan, Z. et al., 2018. Demonstration and Commercial Implementation of Energy Efficient Drying for Walnuts..
- Romas & D.E., 1998. *Walnut Production Manual*..
- Rumsey, T. & Lu, Z., 1991. *High-Temperature Walnut Drying*..
- Rumsey, T. & Thompson, J., 1984. *Ambient air drying of English walnuts*..
- Sablani, και συν., 2007. Evaluating water activity and glass transition concepts for food stability..
- Sivakumar, R., Saravanan, R., Perumal, A. E. & Iniyan, S., 2016. Fluidized bed drying of some agro products.
- Sürmen, Y. & Demirbas, A., 2003. Cofiring of biomass and lignite blends: resource facilities; technological and environmental issues.
- Thompson, J., Stone, M. & Kranzler, G., 1985. *Modified airflow and temperature hop drying*..
- Woodroof, J., 1967. *Tree Nut: Production Processing Products*..
- Wu, Y. et al., 2022. Applications of catalysts in thermochemical conversion of biomass (pyrolysis, hydrothermal liquefaction and gasification): A critical review.

Zhang, M., Tang, J., Mujumdar, A. & Wang, S., 2006. Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables.

Zhihan, D. και συν., 2021. *Solar Energy. A literature research on the drying quality of agricultural products with using solar drying technologies.*

Zhu, K. και συν., 2023. The road to reuse of walnut by-products: A comprehensive review of bioactive compounds, extraction and identification methods, biomedical and industrial applications.

Γκίνης, Ε., 2022. Πειραματικός προσδιορισμός θερμογόνου δύναμης (ΑΘΔ) στερεών καυσίμων βιομάζας με θερμιδόμετρο τύπου οβίδας οξυγόνου, χρήση σε συστήματα θέρμανσης..

Δαβής, Χ., 2016. Ενεργειακή εκμετάλλευση βιομάζας προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας: παρούσα κατάσταση & προοπτικές..

Δαβόρας, Β., 2009. *Βιοκαύσιμα Βιοαιθανόλη συμβάλλουν στη βιώσιμη λύση του ενεργειακού προβλήματος.*

Δαβόρας, Β., 2009. *Βιοκαύσιμα Βιοαιθανόλη συμβάλλουν στη βιώσιμη λύση του ενεργειακού προβλήματος..*

Διαμαντόπουλος, Θ., 2013. *ΞΗΡΑΝΣΗ ΘΕΡΜΟΕΥΑΙΣΘΗΤΩΝ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΜΕ ΣΤΕΡΕΑ ΑΦΥΓΡΑΝΤΙΚΑ ΜΕΣΑ.*

Κατσίρη, Α., 2010-2011. *Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία Ενέργεια από βιομάζα.*

Μπελεσιώτης, Β. & Δεληγιάννη, Ε., 2009. *ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΞΗΡΑΝΣΗΣ – Αρχές διεργασιών ξήρανσης..*

Πολυσίου, Μ., 2008. Αρωματικά και Φαρμακευτικά Φυτά. Προσδοκίες για αγρότες και μεταποιητές του Ν. Καρδίτσας. Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Καρδίτσας.

Ιστοσελίδες

tmagro.com, <https://tmagro.com.ua/ua/>.

toumazatos.gr

thermansipress.gr

panagrotiki.gr

finotherm.gr, <https://www.finotherm.gr/oikiakoi-levites/levitas-viomazas/>.

flowmagazine.gr, https://www.flowmagazine.gr/enas_uperoxos_karpos_to_karudi/.

ypen.gov.gr, <https://ypen.gov.gr/perivallon/kykliki-oikonomia/>.

andapelletmachine.com, <https://gr.fandapelletmachine.com/biomass-fuel-pellet-mill/small-scale-biofuel-bamboo-sawdust-pelletizer.html>.

Unit operations in food processing. <http://www.nzifst.org.nz/unitoperations/drying7.htm>.
ypaithros.gr. <https://www.ypaithros.gr/karydia-polla-yposxomeni-dynamiki-kalliergeia/>.